

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra metalurgie a slévárenství



Metalurgické zpracování vsázky pro jakostní litiny
Metallurgical processing charge for quality cast iron

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor práce:
Vedoucí diplomové práce:

Bc. Lukáš Enenkel
doc. Ing. Jiří Hampl, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Enenkel**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T033 Slévárenské technologie
Téma: **Metalurgické zpracování vsázky pro jakostní litiny**
Metallurgical Processing Charge for Quality Cast Iron

Zásady pro vypracování:

1. Stanovení cíle práce
2. Literární rozbor výroby feritických typů litin
3. Návrh postupu metalurgického zpracování litiny
4. Provedení laboratorních taveb
5. Odlití zkušebních vzorků litin
6. Mikroskopická analýza odlitých vzorků
7. Vyhodnocení cílů a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VONDRÁK, V., HAMPL, J., HANUS, A. *Metalurgie litin-mimopecní zpracování litiny*. VŠB-TU Ostrava, 2005.
- [2] NEUMANN, F. *Gusseisen*, Renningen-Malmsheim: expert-verlag, 1999, ISBN 3-8169-1728-3.
- [3] OTÁHAL, V. *Tvárná litina*, <http://otahalconsult.cz/ukazky-produktu/tvarna-litina/>.
- [4] MYSLIVEC, T. *Fyzikálně chemické základy ocelářství*, SNTL Praha, 1971, 445 s.
- [5] SOKOL, P. *Výroba litiny s kuličkovým grafitem s vyššími užitnými vlastnostmi*. Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, 2005.

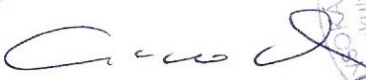
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Hampl, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: prof. Ing. Tomáš Elbel, CSc.

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015


prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

- ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.
- ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.
- ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).
- ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právníké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.
- ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.
- ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.
- ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:
- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
 - Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
 - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

Prohlášení

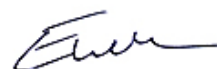
Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odstavec 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odstavce 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona číslo 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě dne 7. 5. 2015



Bc. Lukáš Enenkel
podpis studenta

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval za vedení, poskytnutí nezbytných materiálů a za cenné rady, potřebné k řešení a vypracování mé diplomové práce, panu doc. Ing. Jiřímu Hamplovi Ph.D. Paní Miroslavě Subíkové za umožnění práce na strojích při opracování vzorků a následné zhotovení fotografií mikrostruktury. Paní Ing. Kateřině Konečné za průzkum vzorků na rastrovacím elektronovém mikroskopu. Panu Bc. Jindřichu Bančíkovi ze SPŠ Ostrava – Vítkovice za opracování vzorků určených pro zkoušení mechanických vlastností materiálu a paní Ing. Petře Váňové Ph.D. za spolupráci při jejich následném měření.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na metalurgické zpracování surového železa v elektrické indukční peci, jako vsázkového materiálu, pro výrobu jakostních litin s kuličkovým grafitem. Převážně pak litiny tvárné s feritickou matricí, a požadovanými mechanickými vlastnostmi dle ČSN EN 1563.

Klíčová slova: LKG, feritická matrice, odfosforení, Na_2CO_3

Abstract

This thesis is focused on metallurgical processing of the pig iron in the electric induction furnace as the charge material for the production of the quality cast iron with the spheroidal graphite. Predominantly then ductile iron with the ferritic matrix, and required mechanical properties according to ČSN EN 1563.

Keywords: GJS, ferritic matrix, dephosphorisation, Na_2CO_3

Seznam použitých zkratk

AMEPO s.r.o.	ArcelorMittal Engineering Products Ostrava s.r.o.
AMO a.s.	ArcelorMittal Ostrava a.s.
EOP	elektrická oblouková pec
EIP	elektrická indukční pec
LLG (GJL)	litina s lupínkovým grafitem
LKG (GJS)	litina s kuličkovým grafitem
LČG (GJV)	litina s červíkovitým grafitem
HBW	označení tvrdosti materiálu dle Brinella, měřené pomocí kuličky vyrobené z tvrdokovu
tzv.	takzvaný
TA	termická analýza
Na_2CO_3	uhličitan sodný (soda)
FeSi75	ferosilicium (očkovaadlo)
BIOMET	Fe – Si – Mg (modifikátor) s obsahem Mg 6 – 8 %
CE	uhlíkový ekvivalent
EU	Evropská Unie
REM	rastrovací elektronový mikroskop
4 % Nital	leptadlo na grafitické litiny (6,4 ml kyselina dusičná, 93,6 ml etylalkohol)
FeO	oxid železnatý
P_2O_5	oxid fosforečný
PIG – NOD	typ vsázkového materiálu převážně využívaný pro výrobu LKG v EIP

Obsah

Úvod	1
1. Cíl práce.....	2
2. Rozdělení litin využitelných pro výrobu kokil na ingoty	2
2.1 Grafitické litiny	5
2.1.1 Litina s kuličkovým grafitem (LKG)	6
2.1.2 Litina s červíkovitým grafitem (LČG).....	11
2.2 Křemíkové litiny (LKG se zvýšeným obsahem křemíku Si a molybdenu Mo)	12
3. Teoretické řešení výroby LKG	13
3.1 Vsázkové suroviny	13
3.2 Výběr vsázky pro LKG.....	14
3.3 Chemické složení LKG	15
3.4 Odfosfoření taveniny	18
3.4.1 Odfosfoření taveniny v EOP, pomocí bazických strusek s přidáním oxidu železnatého FeO	18
3.4.2 Odfosfoření taveniny v EIP přidáním Na ₂ CO ₃	19
3.5 Nafosfoření taveniny	21
3.6 Modifikace.....	22
3.6.1 Metody využívající čistý Mg pro modifikaci LKG	24
3.6.2 Metody využívající Mg ve formě předslitin pro modifikaci LKG	26
3.7 Grafitizační očkování	28
3.7.1 Metody grafitizačního očkování	30
4. Experimentální část	32
4.1 Tavby určené optimalizaci navážky Na ₂ CO ₃	32
4.1.1 Tavba I. pro optimalizaci Na ₂ CO ₃	33
4.1.2 Tavba II. pro optimalizaci Na ₂ CO ₃	34
4.2 Tavby pro výrobu tvárné litiny	38
4.2.1 Tavba I.	40

4.2.2 Tavba II.	43
4.2.3 Tavba III.	47
4.2.4 Tavba IV.	48
4.2.5 Tavba V.	50
4.2.6 Tavba VI.	53
5. Závěr.....	56
6. Seznam obrázků.....	58
7. Seznam tabulek.....	60
8. Seznam použité literatury	62

Úvod

Slitiny železa s obsahem uhlíku nad 2,14 %, známé především jako litiny, stávají na světovém trhu prim při výrobě odlitků. Kritériem pro daná odvětví jsou samozřejmě mechanické vlastnosti, které přednostně ovlivňuje tvar a velikost odlitku a způsob vyloučení grafitu. Nejvýznamnější a dosud jedna z nejvyužívanějších skupin jsou tvárné litiny specifikované dle ČSN EN 1563 nejen díky své výborné opracovatelnosti, ale také velice ekonomicky výhodné výrobě. Využívají se převážně pro díly vystavené vysokému pevnostnímu a dynamickému namáhání.

Tvárná litina by měla splňovat homogenní strukturu s požadovaným typem matrice a vyloučeným grafitem ve tvaru kuliček (tzv. kuličkový grafit), jež je vytvořen přeměnou lamelárního grafitu, zpracováním roztavené litiny hořčíkem či cerem, procesem zvaným modifikace. Ačkoliv příprava tvárné litiny přispívá k nízké nákladovosti výroby, je pro většinu podniků stěžejní bod.

Zmiňovaná jakostní litina je nejdůležitější materiál pro odlitky v automobilovém průmyslu, kde činí bezmála polovinu produkce všech odlitých součástí. Rostoucí zájem o úspory energií při výrobě a snížení hmotnosti automobilů vedly k vývoji odlehčených materiálů bez patřičného ohledu na jejich vlastnosti. V minulých letech byly prováděny pokusy nahradit klasickou šedou litinu a ocel, komponenty z hliníku a bainitické tvárné litiny (ADI). ADI je speciální typ tvárné litiny, který prochází specifickým typem tepelného zpracování tzv. izotermickým kalením. Ve finále získáme základní kovovou hmotu podobnou bainitu.

Využití však tvárná litina nalézá také v těžkém průmyslu na výrobu dílů pro obráběcí a tvářecí stroje, zemědělské stroje a zároveň i pro kovové formy (kokily), které jsou nedílnou součástí mnoha sléváren. Výrobou kokil z tvárné litiny se zabývá také dceřiná společnost firmy ArcelorMittal Ostrava a.s. (AMO a.s.), ArcelorMittal Engineering Products Ostrava s.r.o. (AMEPO s.r.o.), která pro výrobu LKG nakupuje drahý vsázkový materiál i přes možnost zpracovávat vlastní surové železo přímo v EIP.

Následující teoretická část řeší možnosti výroby LKG pro kokily v AMEPO s.r.o. a bude navržen efektivní a ekonomický způsob metalurgického zpracování surového železa v EIP s dosažením požadované struktury, mechanických vlastností a chemického složení LKG dle ČSN EN 1563. V experimentální části se uskuteční několik taveb, které teorii ověří, a potvrdí platnost systémů pro metalurgické zpracování litiny.

1. Cíl práce

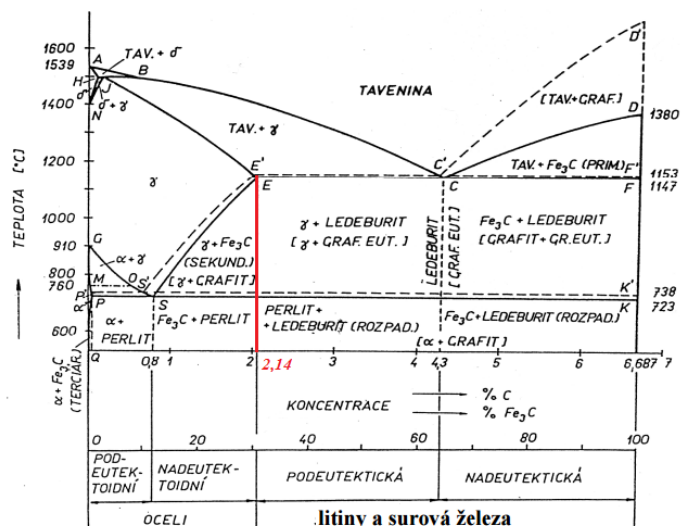
Základem teoretické části je popis druhů litin využívaných ve slévárenské praxi pro objemné odlitky a jejich členění do skupin. Následují vlivy primárně obsažených prvků, které mohou svou přítomností zlepšit či zhoršit výsledné mechanické vlastnosti, a metalurgické operace pro docílení požadovaného tvaru grafitu a finálního chemického složení.

Hlavním cílem je vytvoření metody pro metalurgické zpracování vysokopecního železa jako vsázkového materiálu pro výrobu LKG v EIP. Zprvu teoretickými úvahami a poté ověřením v části experimentální dojde k potvrzení správnosti námi vytvořeného procesu. Tento problém je řešen převážně díky neekonomičnosti nákupu drahých materiálů jako např. PIG – NOD, které splňují čistotu vsázkového materiálu požadovanou při výrobě LKG. Výzkum je zaměřen na vytvoření postupu pro snížení množství P ve slévárně AMEPO s.r.o. na EIP ze surového železa, které se vyrábí ve společnosti AMO a.s. Tím docílíme snížení nákladů na vsázkový materiál, a vytvoříme metodu, díky které bude možno provádět odfosfoření surového železa přímo na EIP.

Finální chemické složení a struktura vytvořené LKG, by měly splňovat kritéria pro tvárné litiny. Vysokou tažnost v rozmezí 15 – 25 %, tvrdost 150 – 250 HB a cílená struktura by měla obsahovat kuličkový grafit s matricí buď čistě feritickou, nebo alespoň feriticko – perlitickou pro dosažení požadované tažnosti materiálu.

2. Rozdělení litin využitelných pro výrobu kokil na ingoty

Litiny, jako slitiny železa, uhlíku a dalších obsahujících prvků, se rozdělují dle vyloučeného uhlíku v podobě grafitu či vázaného ve formě karbidů Fe_3C . Množství obsahu uhlíku C litin je vyšší než jejich maximální rozpustnost v austenitu - větší než 2,14 % C, což je číslo známé jako dělicí bod ocelí a litin v diagramu železo uhlík (Fe – C) viz obr. 1.



Obr. 1 Schéma rovnovážného binárního diagramu metastabilní (plně) a stabilní (čárkovaně) soustavy Fe – Fe₃C [3]

Krystalizace litin probíhá dvěma způsoby, buďto podle metastabilního systému Fe - Fe₃C (eutetikem je ledeburit, tvořen austenitem a cementitem) nebo podle systému stabilního (vznik grafického eutektika, tvořeného austenitem a grafitem). Jen ve výjimečných případech se během ochlazování využívají oba systémy. Na rozdíl od ocelí se u litin nesetkáme s čistě primární fází. Je vždy doprovázena eutetikem a u litin s eutektickým složením obsahují pouze čisté eutektikum.

Základní rozdělení zpravidla v literatuře nalezneme tedy na:

- grafické litiny – tuhnutí podle stabilního diagramu Fe – C
- maková litina – přechodový typ mezi grafickými a bílými litinami
- bílé litiny – tuhnutí podle metastabilního diagramu Fe – C

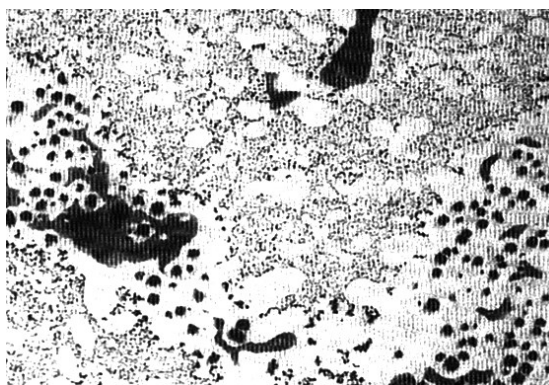
Jelikož jsou bílé litiny velice křehké, neobrobitelné a mají vysokou tvrdost a při výskytu zákalky a makové struktury, která je pro ledeburit běžná, nepřicházejí v úvahu pro odlitky ve společnosti AMEPO s.r.o., kde se odlévají odlitky s následným obráběním a určená do těžkých provozů s následným silovým namáháním. Možností je přechod díky tepelnému zpracování bílé litiny na litinu temperovanou, kdy rozpadem cementitu získáme grafickou strukturu.

Požadované složení litiny pro výrobu kokil

Zásadním poznatkem pro výrobu objemných odlitků je pomalé chladnutí a tuhnutí. Proto struktura obsahuje menší počet grafitových zrn a eutektických buněk, a dochází ke snížení houževnatosti materiálu. Z toho plyne požadavek na co nejmenší obsah prvků, které mají sklon k této segregaci.

Pozvolné ochlazování odlitku podporuje flotaci grafitu, která v takto napadených místech snižuje mechanické vlastnosti. Optimální je tedy volit složení litiny eutektické, nebo mírně podeutektické.

CE je řízen tloušťkou stěn odlitku. Jako optimum se uvádí hodnota kolem 3,3 – 3,5 %. Pro minimální výskyt ředin je zapotřebí obsah Si do 2,25 %. U kokil je vyžadována zvýšená tažnost, proto je zapotřebí množství Si optimalizovat a zajistit feritickou matici. Pro eliminaci nejčastější strukturní vady objemných odlitků, přechodových forem grafitu (viz obr. 2), je nutné udržovat množství Mg na hranici nejméně 0,055 %. Kvůli nízkému počtu grafitových zrn je důležité opožděné očkování (viz 3.7.1 metody grafitizačního očkování), díky kterému se jejich množství zvýší. Další možnou metodou je zkrácení doby tuhnutí odlitku, pomocí vnějších, trubkových, chladících systémů. [1, 5]

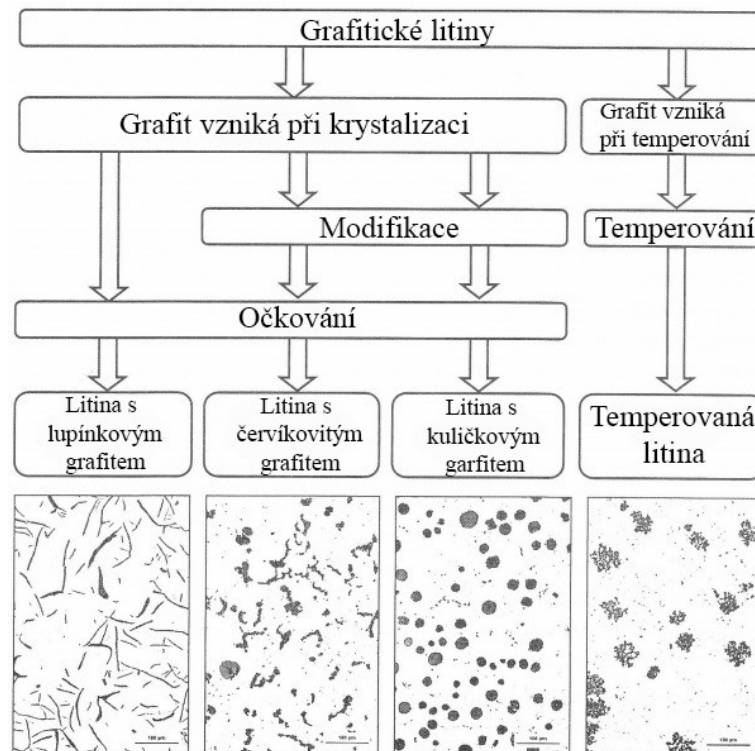


Obr. 2 LKG, grafit chunky 60, VI 40, zv. 100 x, neleptáno [1]

2.1 Grafitické litiny

Pro odlévání objemných odlitků v našem případě kokil, pro odlévání ocelových ingotů ve společnosti AMEPO s.r.o., je nutné užívat pouze litiny, které jsou schopny vydržet tepelné namáhání a manipulaci v těžkém provozu, tzn. s vysokou pevností, houževnatostí, možností tepelného zpracování a nízkým množstvím vnitřních vad po odlití. Nutností je však splňovat normy potřebné pro životnost kokil dle doplňkové normy ČSN EN 1559 – 3, ovšem vždy záleží převážně na typu odlévané slitiny. Tyto podmínky zcela splňují mimo oceli také litiny grafitické, jež jsou z ekonomického hlediska jasnou volbou pro výrobu těchto odlitků. Jsou schopny se při správném zpracování metalurgické vsázky, přiblížit mechanickým hodnotám oceli natolik, že pro výrobu již zmiňovaných kokil, jsou jedinou, ekonomicky výhodnou variantou. Náklady na jejich výrobu jsou zanedbatelné, avšak vytvoření potřebného druhu litiny je doprovázen několika faktory. Při vložení vsázkového materiálu do agregátu, je důležité se zaměřit, který typ litiny je nutné získat, a proto se musí obsah doprovodných prvků upravovat již při zpracování surového železa, nebo následně v agregátech určených k tavení litin, ať už jde o kupolní pec, indukční či obloukové pece. O tento postup jde převážně u tvárné grafitické litiny, protože výsledná struktura závisí hlavně na čistotě vsázkového materiálu. Kvůli případným nečistotám musí být následně prováděny operace k odstranění škodlivých prvků, jak tomu bylo v našem případě.

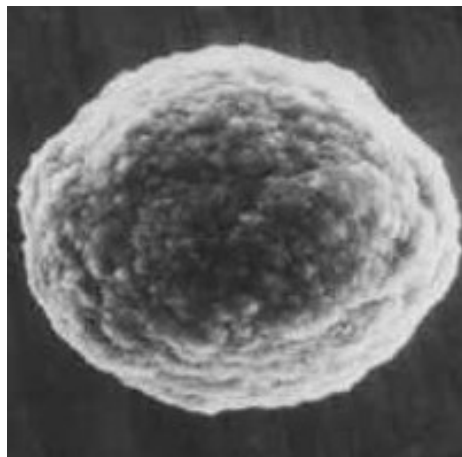
K výrobě kokil ve slévárně AMEPO s.r.o. se nabízejí možnosti použití celé skupiny grafitických litin (viz obr. 3), avšak LKG je nejvýhodnější z hlediska mechanických vlastností. Po zavedení úpravy surového železa na EIP námi stanovenou metodou pro výrobu LKG, může nahradit ostatní litiny z této skupiny.



Obr. 3 Rozdělení grafitických litin dle tvaru grafitu [6]

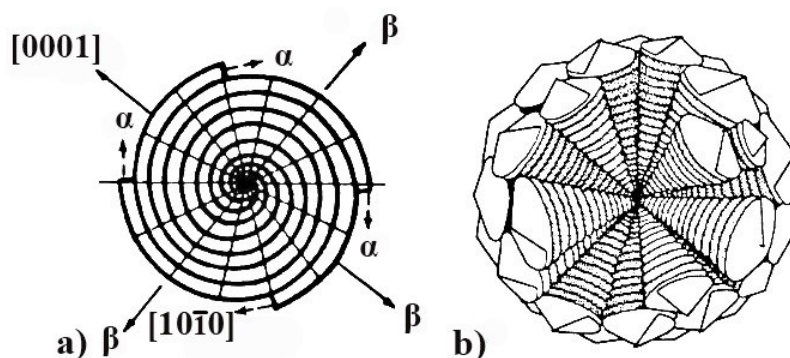
2.1.1 Litina s kuličkovým grafitem (LKG)

Tvárná litina, v minulosti nazývaná též tažná šedá nebo také nodulární litina, je nejvíce využívanou formou litin po celém světě. Již zhruba 25 let je však normalizován název litina s kuličkovým grafitem, jež je zřejmý z tvaru vyloučeného grafitu na obr. 4.



Obr. 4 Celé zrno kuličkového grafitu [1]

Mechanismy vzniku kuličkového grafitu se snaží popsat již celá řada teorií. Často ale vychází z předpokladu spirálového růstu grafitu sbalováním lamel, roustoucích ve směru α , po obvodě kuličky (viz obr. 5). Model vychází z přirozené tendence grafitu ke sbalování v čistých slitinách. Další teorie předpokládá, že hořčík a cer se koncentrují na mezifázovém rozhraní a tím blokují růst v prismových rovinách. Způsob růstu je však vždy závislý na velikosti přechlazení. Další růst grafitu je tedy možný pouze při vytvoření nových bazálních rovin ve směru β tzv. mechanismus šroubových dislokací na obr. 5. Existují však i práce, které dokazují součastné působení obou teorií, kdy je centrum kuličky tvořeno spirálně a vnější část roste pyramidálně. [2]



Obr. 5 Schématické znázornění růstu kuličkového grafitu – a) spirálový růst; b) růst tvorbou bazálních rovin [2]

Průkopníky při výrobě LKG byli pánové H. Morrogh a H. J. Williams z Anglie, kteří v roce 1946 navrhli výrobu LKG nadeutektického složení přísadou ceru. Roku 1947 američtí inženýři K. D. Millis, A. P. Gangebin a N. P. Pilling vyrobili LKG pomocí hořčíku, což napomohlo k hromadné výrobě této litiny také ve slévárnách Československé republiky.

Po roce 1950 se výroba rozšířila hned do několika závodů např. ČKD Praha, ŠKODA Plzeň, Moravské železárny Olomouc, Vítkovické železárny Ostrava, Třinecké železárny, atd. V této době se oproti světové produkci v ČR vyrobí jen zlomek odlitků z LKG, avšak dle statistického znázornění časopisu Slévárnství (viz tab. 1), můžeme pozorovat mírné zlepšení, které může v následujících letech vyústit v silné převaze výroby LKG oproti LLG. [9]

Tab. 1 Statistický přehled výroby LKG v ČR v roce 2008 [9]

Slévárny	pecní agregát	počet sléváren	zpracovací pochod modifikace	modifikátor	současná výroba s jiným materiálem
oceli	obloukové pece	4	přelévací	FeSiMg NiMg	ocel 50 % LKG 50 %
		1	přelévací + plněný profil	FeSiMg v plněném profilu	ocel 80 % LKG 20 %
	obloukové + indukční pece	6	přelévací	FeSiMg NiMg	ocel 90 % LKG 10 %
litiny	indukční pece	28	přelévací	FeSiMg	LLG 80 % LKG 20 %
		2	Flotret	FeSiMg	LLG 50 % LKG 50 %
		4	plněný profil	v plněném profilu	LLG 60 % LKG 40 %
		2	Inmold	FeSiMg	LLG 50 % LKG 50 %
	kupolní pece	3	přelévací	FeSiMg	LLG 50 % LKG 50 %
		1	plněný profil	v plněném profilu	LLG 70 % LKG 30 %
	plamenné pece	1	přelévací	FeSiMg15	LLG 80 % LKG 20 %

Rozdíl mezi litinou tvárnou a šedou je především v mechanických vlastnostech, kterými první zmíněná mnohonásobně převyšuje. Klasická šedá litina je základ pro výrobu tvárné. Vychází ze změny tvaru grafitu z lamelárního na kuličkový (nodulární), pomocí již zmiňované metody modifikace, přidáním cca 1 hmotnostního % hořčíku nebo ceru.

Důvodem zlepšení mechanických vlastností při změně tvaru grafitu je vytvoření méně nespojitostí ve struktuře kovu, zhutnění materiálu a vytvoření pevné litinové struktury. Na konečné mechanické vlastnosti má samozřejmě vliv, jako u LLG, struktura matrice. U nelegovaných litin po odlití známe 3 druhy matic:

- feritická
- feriticko – perlitická
- perlitická

Ačkoliv se pevnost šedých litin nevyrovná ani zdaleka ocelím a odrazují zákazníky svou křehkostí, tvárná litina reputaci litin zlepšuje a díky nízkým nákladům na výrobu se pro většinu odlitků jeví mnohem ekonomicky výhodnější. Nahrazení ocelí za tvárnou litinu můžeme nejvíce zaznamenat v automobilovém průmyslu.

LKG má ve většině případů eutektické složení. V praxi se ale můžeme setkat také se složením mírně nadeutektickým, tedy $CE \sim 4,2 - 4,7$. Chemické složení typické pro tento druh litin je znázorněn v tab. 2, kdy ale díky udanému množství procentuálnímu množství hořčíku nemusí postačovat k potřebnému sferoidizačnímu účinku, proto se v praxi převážně volí množství daného prvku od 0,025%. Preferovaná tabulková hodnota maximálního množství fosforu v LKG je také ve většině případů nereálná, proto se akceptuje také množství od 0,04 do 0,06%. [1]

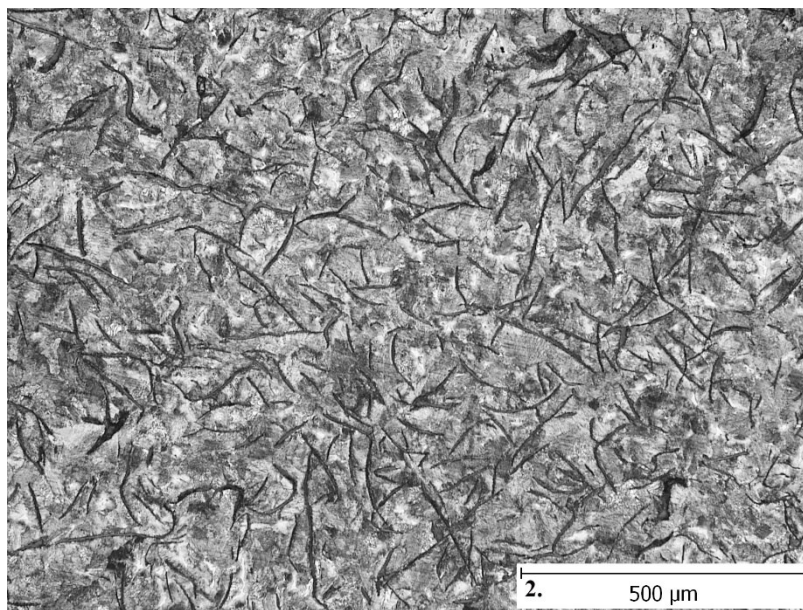
Tab. 2 Preferované chemické složení LKG v hmotnostních procentech [1]

% C	% Si	% Mn	% P _{max}	% S _{max}	% Mg	% Cu
3,5 – 3,8	2,0 – 2,5	0,08 – 0,65	0,035	0,01 – 0,02	0,02 – 0,065	0,02 – 0,8

Výborné mechanické vlastnosti litiny tvárné jsou především dané tvarem grafitu, jež je na rozdíl od litiny s lupínkovým grafitem (LLG) úměrný tzn., že jeho délka i šířka jsou obdobné, jelikož jde o tvar koule. K růstu grafitu ve tvaru kuličky dochází po modifikaci litiny globulitizačními prvky. Jako prvek vhodný k modifikaci se převážně využívá hořčík, popřípadě společně s cerem a dalšími kovy vzácných zemin.

U LLG jsou naopak mechanické vlastnosti nejnižší a to je zapříčiněno zvětšenou délkou lupínek oproti jejich šířce (viz obr. 6). Proto v případech, kdy je žádáno zvětšení houževnatosti či nutnost finální úpravy odlitku soustružením, je pro vytvoření litiny tvárné nutné podrobit vsazený materiál modifikaci. Nepříznivý vliv má také zúžení lupínek, kde na ostrých koncích probíhá koncentrace napětí. [3, 4, 10]

Mezi hlavní charakteristiky patří výborná tuhost (Youngův modul), dobrá rázová houževnatost a značná pevnost v tahu. Nevýhodami mohou být špatná tepelná vodivost (při obrábění -> kumulace tepla) a špatná tlumící schopnost, avšak při výrobě kokil pro lití oceli s těmito vlastnostmi nezabýváme, protože k dokončovacím úpravám frézováním či soustružením nedochází.



Obr. 6 Tavba I. pro optimalizaci Na_2CO_3 ,LLG, grafit I 100, perlit 95, zv. 100 x, leptáno 4 %

Nital

Kokily pro ingoty, jsou kromě LLG, vyráběny také z LKG. Je nejvhodnějším materiálem díky své tvarové stabilitě při vysokých teplotách, tepelné vodivosti, dilataci, dobré zabíhavosti a hlavně zvýšené houževnatosti oproti šedé litině. Slévárna se specializuje na výrobu LKG především dle norem ČSN 422304, 422305, 422306, 422307, tedy tvárných litin značených dle platné normy EN 1563 - EN GJS 400-18, EN GJS 500, EN GJS 600 a EN GJS 700 (viz tab. 3). [7]

Tab. 3 Seznam typů tvárné litiny vyráběné v závodě AMEPO s.r.o. [7]

EN 1563	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Smluvní mez kluzu R_{p02} [MPa]	Tažnost A [%]
EN – GJS – 400	400	240	15
EN – GJS - 500	500	320	7
EN – GJS – 600	600	370	3
EN – GJS – 700	700	420	2

2.1.2 Litina s červíkovitým grafitem (LČG)

Litina s červíkovitým grafitem (LČG) je moderní materiál náročný na výrobu. Vermikulární litiny, jež je starší, méně používaný název LČG, kombinuje některé vlastnosti LLG a LKG jako je např. vyšší tepelná vodivost, vyšší tlumení vibrací a současně vyšší pevnost a tažnost. Do jisté míry však kombinuje všechny vlastnosti obou zmiňovaných litin. Co se chemického složení týče (viz tab. 4), můžeme konstatovat, že se jedná o složení eutektické. Označení LČG je v tabulka dle normy DIN 1693, jelikož v evropské normě EN 1563, není tento typ litin normován. [1, 2]

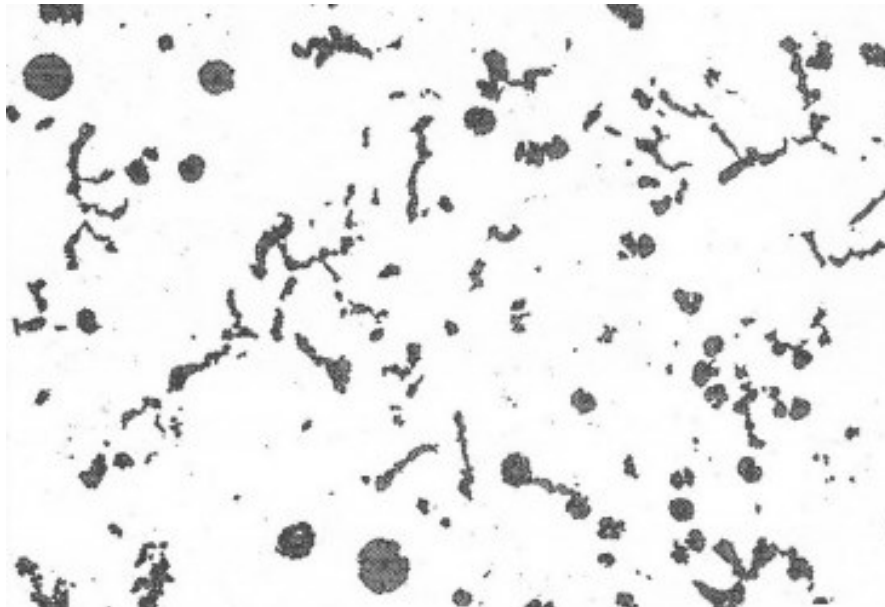
Tab. 4 Chemické složení a mechanické vlastnosti LČG; GGV – 30 (s feritickou maticí)
a GGV – 40 (s perlitickou maticí) [2]

DIN 1693	Chemické složení [%]	Mechanické vlastnosti			
		Smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrdost HB 30
GGV – 30	C -> 3,2 – 3,6 Si -> 2,7 – 3,2	min. 240	min. 300	min. 2	130 – 190
GGV - 40	Mn -> 0,1 – 0,6 P_{MAX} -> 0,1	min. 280	min. 400	1 – 2,5	190 - 280

V této litině je grafit vyloučen, jak již název napovídá, ve formě červíkovitých útvarů (viz obr. 7). Grafit v podobě červíků je podlouhlý a náhodně orientovaný, podobně jako u LLG, ale je kratší, tlustší, má více zaoblené hrany a jeho povrch je nepravidelný a hrbolatý. Zajištění adheze mezi grafitickými částicemi a železnou maticí přispívá k vysokým mechanickým vlastnostem. Často ve struktuře nalézáme také grafit nedokonale zrnitý, který při nízké koncentraci ovlivňuje výsledné vlastnosti jen zřídka.

Tepelné vlastnosti a schopnost tlumení rázů se nacházejí mezi LKG a LLG, avšak odolnost proti únavovému porušení je až dvakrát větší než u LLG a mez pevnosti v tahu dosahuje až trojnásobku. V některých odvětvích je LČG využívána přednostně, díky své výborné zabíhavosti.

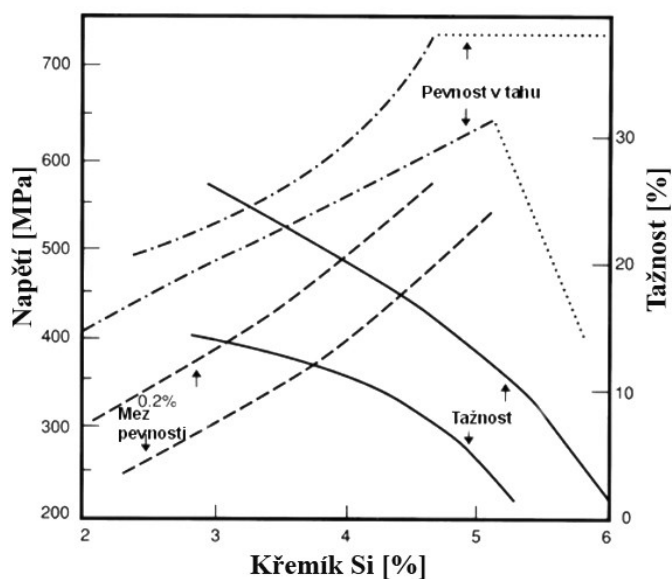
Výroba LČG je obdobná jako u LKG, avšak aplikované množství očkovačů a modifikátorů se liší. Postup při volbě vsázkového materiálu je volen stejně takže, základem je čistý vstupní materiál neobsahující nečistoty, jež mohou podpořit metastabilní tuhnutí, tedy výrazně ovlivnit tvar grafitu. [1, 2, 3]



Obr. 7 LČG, grafit III 75, VI 25, zv. 100 x, neleptáno [6]

2.2 Křemíkové litiny (LKG se zvýšeným obsahem křemíku Si a molybdenu Mo)

U tohoto typu litin hovoříme o LKG nebo LLG, se zvýšeným obsahem Si, který se pohybuje až do obsahu 20 hm. %. Pro potřebnou tažnost, nesmí však obsah přesáhnout nejnižší hodnotu Si (viz obr. 8), z důvodu konstantního růstu pevnosti v závislosti na množství Si. Křemík slouží jako prvek, který zajišťuje žárovečnost a korozní odolnost v kyselém prostředí. Proto pokud je u odlitku vyžadována zvýšená korozivzdornost a žárovečnost, je zapotřebí užít křemíkové litiny s lupínkovým grafitem, ale v našem případě, kdy je zapotřebí vyšší tažnost, je nutno volit křemíkové litiny s kuličkovým grafitem. Tato litina, známá též jako Silal (viz obr. 8), je pro výrobu kokil často využívaná, s oblastí použití do 800°C pro LLG a do 900°C pro LKG. Možná je také kombinace s molybdenem Mo do 2 %, která již při obsahu 0,5 % výrazně zvyšuje creep a napětí na mezi tečení při vyšších teplotách.



Obr. 8 Graf vlivu obsahu Si na mechanické vlastnosti pro Silaly [1]

Tyto litiny jsou vzhledem ke své stálosti vysokých pevností v oblasti cyklického namáhání při vysokých provozních teplotách, odolnosti proti oxidaci a vysoké stabilitě struktury materiálu, vhodné pro výrobu kokil. Uváděné vlastnosti jsou dány přítomností již zmíněného Si, jež v křemíkových litinách za zvýšených teplot stabilizuje feritickou fázi a tvoří povrchové vrstvy, které brání oxidaci. Si stabilizuje ferit pomocí zvyšování kritické transformační teploty pro přeměnu fází. Pokud však dojde k překročení teploty objemových změn, které jsou důsledkem přeměny feritu na austenit, dojde k porušení vrstev bránících oxidaci. [1, 17, 18]

3. Teoretické řešení výroby LKG

3.1 Vsázkové suroviny

Základním kritériem pro výrobu tvárné litiny je používat suroviny s nízkým obsahem síry, fosforu, karbidotvorných prvků a nečistot, které následně ovlivňují tvar grafitu. Nároky na kvalitu vsázkového materiálu pro LKG značně převyšují požadavky vsázky pro LLG. Při tavení v EIP s využitím námi stanoveného metalurgického procesu mohou být nároky na kvalitní vsázku sníženy, než je tomu u ostatních tavících agregátů.

Surové železo

Z důvodu nutnosti využití kvalitních, velmi čistých vsázkových materiálů, jsou běžné typy surových želez pro výrobu LLG, nevyhovující pro vysoký obsah Mn a převážně P. Proto při výběru firmy většinou dávají přednost speciálním surovým železům např. zn. PIG NOD, nebo čistá vysokopeční surová železa.

Litinový odpad

Z důvodu neznámého původu litinového odpadu se od jeho použití ve většině případů upouští. Pokud ovšem jde o odpad námi vyrobený o známém chemickém složení a vyhovující kvalitě, jeho užití samozřejmě přichází v úvahu. Avšak v tomto případě už hovoříme o vsázkovém materiálu známém též jako vratný materiál při výrobě. Pro slévárny, které vyrábí jak LLG, tak LKG, je nutné pečlivě sledovat a dělit tento vratný materiál, aby se zabránilo následnému mísení. U LKG je rovněž nutné rozdělovat různé druhy této slitiny, zejména však kvůli obsahu perlitotvorných prvků. Množství vratu může být ve vsázce omezeno množstvím finálního modifikování taveniny, z důvodu vysokého obsahu Si. [2, 11]

Ocelový odpad

Obdobně jako u odpadu litinového, je nutno dbát na chemické složení a to zejména v obsahu manganu a karbidotvorných prvků. Může dojít k zanesení škodlivých látek, ale také plynů např. dusík N₂. Často využívaným, kvalitním, produktem pro vsázku je ocelový, hlubokotažný plech.

3.2 Výběr vsázky pro LKG

Kritéria stanovené pro výběr vsázkového materiálu:

- druh tavicího agregátu (EIP, EOP, ...)
- požadovaná finální kvalita kovu (mechanické vlastnosti, struktura)
- cena vsázkového materiálu a celkové ekonomická stránka při výrobě
- způsob finální úpravy pro výrobu LKG – druh a množství
 - očkování
 - modifikace

Základním požadavkem z hlediska vsázkového materiálu je vysoká čistota, která vynechává obsahy prvků jako je Mn a P, ale důležité je také dbát na množství Si. V důsledku následných, metalurgických procesů, dochází k aplikaci Si ve formě jak očkovačů, tak modifikátorů a pro docílení požadovaného finálního množství Si přibližně 2,5 % je nutné kontrolovat jeho obsah už ve vsázkovém materiálu. [2, 5, 11]

Pro zjištění obsahu Si v tavenině lze tedy užít vzorec, který počítá s množstvím vázaného Si v modifikátoru a očkovadla [11]:

$$Si_{VS} = Si_{FS} - Si_M - Si_O \quad (1)$$

Si_{VS} ... výchozí stav obsahu Si v tavenině před modifikací a očkovaním

Si_{FS} ... finální, požadovaná stav obsahu Si ve vyrobené LKG

Si_M ... obsah Si přidany do taveniny modifikací

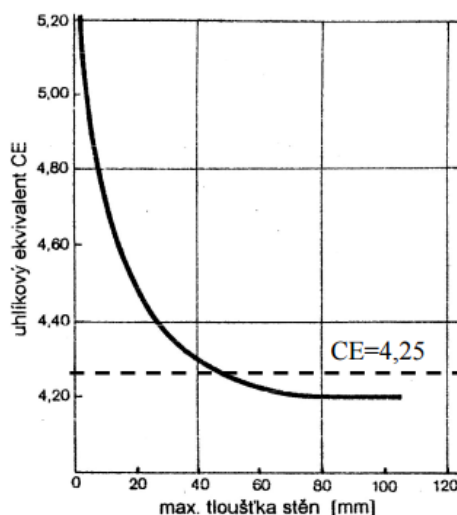
Si_O ... obsah Si přidany do taveniny očkovaním

3.3 Chemické složení LKG

Pro stanovení chemického složení výchozího stavu LKG, je zapotřebí znát požadovanou strukturu odlitku v závislosti na objemu odlitku, tloušťce stěn a z toho plynoucí rychlost ochlazování. U nelegovaných LKG, jak je tomu v našem případě se předpokládá, že chemické složení zajistí požadovanou strukturu již v litém stavu, kdy tedy odpadá nutnost následného tepelného zpracování. [1, 3, 4, 12]

Uhlíkový ekvivalent CE – obsah C a Si

Uhlíkový ekvivalent využívaný u slitin železa je zaveden pro stanovení různých vlastností slitin, kde je užito více legujících prvků nežli C. Cílem je převést procentuální množství legujících prvků na ekvivalentní, procentuální množství C v tavenině. Uhlíkový ekvivalent se volí zejména v závislosti na tloušťce stěny odlitku (viz obr. 9). LKG má eutektické až nadeutektické složení.



Obr. 9 Graf závislosti uhlíkového ekvivalentu na tloušťce stěny odlitku, znázorňující optimální CE pro LKG [1]

Podíl perlitické a feritické matrice ve struktuře je závislý především na poměru obsahu C a Si. Vyšší hodnota tohoto poměru, při zachování CE vytváří vyšší podíl perlitické matrice. Naopak menší hodnota vede k vytvoření matrice feritické.

Ideální obsah C v LKG se pohybuje v rozmezí 3,4 – 3,9 % C a obsah Si je mezi 2,2 – 2,8 %. Doporučený CE pro LKG znázorňuje tab. 5, kde je možné se ztotožnit, pro výrobu objemných, silnostěnných kokil pro ingoty, s posledním řádkem, který je určen pro odlitky s tloušťkou stěny větší než 100 mm.

Tab. 5 Doporučené množství C a Si, pro výrobu LKG s požadovaným druhem matrice s ohledem na tloušťku stěny odlitku [3]

Tloušťka stěny (mm)	Struktura v litém stavu					
	Převážně perlitická			Převážně feritická		
	C (%)	Si (%)	C _E	C (%)	Si (%)	C _E
6	3,85	2,65	4,7	3,85	2,85	4,8
12	3,70	2,45	4,5	3,70	2,60	4,55
25	3,60	2,35	4,4	3,55	2,50	4,4
50	3,45	2,20	4,2	3,40	2,35	4,2
75	3,40	2,20	4,15	3,35	2,35	4,15
100 a více	3,40	2,15	4,1	3,35	2,25	4,1

Stupeň eutektičnosti SE

Tato veličina udává poměr obsahu C v litině, k obsahu C odpovídajícímu eutektickému složení. Dle stupně eutektičnosti SE se litiny dělí do tří skupin:

- podeutektická litina; $SE < 1$
- eutektická litina; $SE = 1$
- nadeutektické litina; $SE > 1$

V našem případě je vyžadovaná litina eutektická čili SE bude rovno 1.

Fosfor

Fosfor je společně se sírou S a manganem Mn, nejméně žádaným doprovodným prvkem při výrobě LKG. Segregací k hranicím zrn tvoří steadit a výrazně zhoršuje mechanické vlastnosti, zejména pak tažnost a lomovou houževnatost. Maximální povolené množství P v LKG je 0,08 %, u silnostěnných odlitků pak 0,02 %. Tyto hodnoty se mohou v různých publikacích lišit, avšak stále platí, čím menšího obsahu docílíme, tím je to pro mechanické vlastnosti LKG lepší.

Mangan

Mangan Mn má v LKG silný perlitotvorný účinek. Pro dosažení feritické matrice již v litém stavu, je nutné dodržet jeho nejnižší obsah do cca 0,15 % Mn. Perlitická matrice je vytvořena při obsahu až 0,7 % a při zvýšeném množství je možné pro zachování struktury legovat 0,5 – 1,5 % Cu.

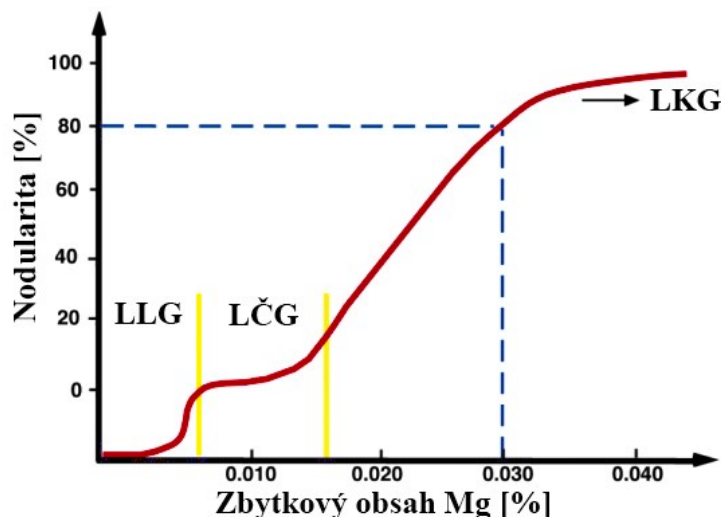
V objemných odlitcích dochází k výrazně pomalejšímu ochlazování celého objemu odlitku, dochází k výrazné segregaci Mn na hranicích zrn a do osových partií. V lokacích, kde dochází ke shromažďování Mn, se mohou tvořit karbidy.

Síra

Výchozí obsah síry S ve vsázce není ve většině případů převyšující 0,03 %. V rámci výroby LKG se nemusíme věnovat snižování obsahu S speciálními metodami, jelikož při modifikaci taveniny se převážná část S váže na hořčík Mg dle reakce (2). Finální obsah S ve vytvořené LKG, je proto velice nízký a dosahuje hodnot okolo 0,01 %.



Množství S ve vsázkovém materiálu nesmí navázat veškerý Mg aplikovaný ve formě FeSiMg8. Množstvím zbytkového Mg v tavenině pod 0,03 % nelze docílit krystalizaci C na grafit kuličkového tvaru (viz obr. 10). Eliminace efektu úbytku Mg zvýšením navážky modifikátoru je velmi neekonomická a hodnota Si může překročit hraniční obsah LKG. Pokud je k modifikaci užíván čistý Mg, je možné užít výchozí materiál o obsahu S až 0,17 %. S využitím námi stanovené metody odfosfoření pomocí Na₂CO₃ v EIP může množství S vsázkového materiálu dosahovat až 0,2 %. Dle pana Moriy [13] totiž dochází při aplikaci Na₂CO₃ nejen k oxidaci P, ale navíc ke snížení S k téměř nulovým hodnotám (viz obr. 13), což umožňuje modifikaci ekonomicky výhodnějším FeSiMg8. [1, 3, 4, 12]



Obr. 10 - Graf znázorňující výsledný tvar grafitu v litinách v závislosti na množství zbytkového Mg [12]

Karbidotvorné prvky a nečistoty

Obsah karbidotvorných prvků u LKG musí být velice nízký, kvůli jejich silnému účinku. Pro feritickou matici LKG je požadován obsah chromu $\text{Cr} < 0,04$. Jak již bylo zmíněno, LKG jsou oproti LLG velmi náchylné na přítomnost nečistot a karbidotvorných prvků. Působí nepříznivě převážně na tvar grafitu, kdy způsobují jeho degeneraci. Mezi nejškodlivější doprovodné prvky patří olovo Pb, kadmium Cd a bismut Bi, které jsou obsaženy ve vsázkových materiálech. Proto je nutno využívat jen materiály se známým původem a chemickým složením. [1, 3, 4]

3.4 Odfosfoření taveniny

Odstranění fosforu P je jednou z nejdůležitějších operací metalurgického zpracování surového železa. Při vynechání tohoto procesu se zvyšuje křehkost výsledného materiálu z důvodu vylučování na hranicích zrn kovové matrice.[18, 19]

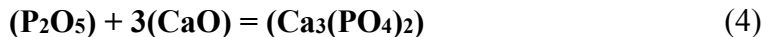
3.4.1 Odfosfoření taveniny v EOP, pomocí bazických strusek s přidáním oxidu železnatého FeO

Pro odfosfoření surového železa v EOP je základním požadavkem silně oxidační prostředí a struska s vysokou bazicitou. Pece se zásaditou vyzdívkou (EU), jsou pro odfosfoření v EOP nejvyužívanější. Kyselá vyzdívka EOP se používá pouze pro přetavení vsázky s vyhovujícím obsahem P, jelikož vzniklá kyselá struska není schopna vázat P.

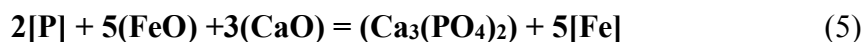
Proces odfosfoření je dvoustupňový, kdy v první fázi dochází k oxidaci P na mezifázovém rozhraní se struskou pomocí FeO (3).



Následuje stabilizace P_2O_5 ve strusce zásaditým oxidem CaO (4).



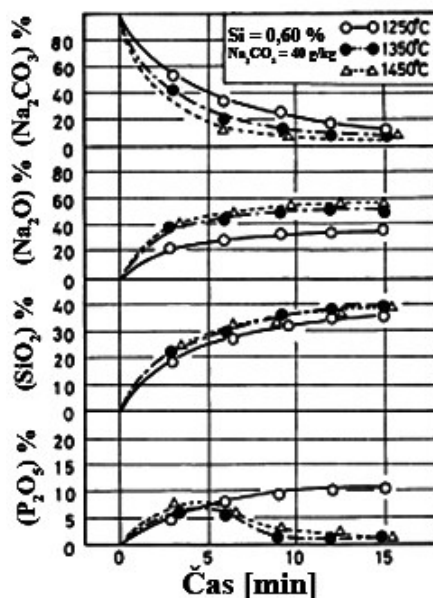
Výslednou rovnici odfosfoření taveniny lze tedy následně zapsat viz (5) [18, 20]



P se v roztaveném, surovém železe nachází v atomární podobě. K oxidaci a přechodu P do strusky dochází na mezifázovém rozhraní struska – kov. Obsah FeO ve strusce vyšší než 20 %, podle Brože [20], však snižuje aktivitu CaO, z důvodu přítomnosti kyselého Fe_2O_3 . Naopak vysoký obsah CaO zvyšuje teplotu likvidu, tedy viskozitu a hustotu materiálu, což má za následek omezení oxidace P čímž se zpomaluje odfosfoření taveniny. [18, 19, 20]

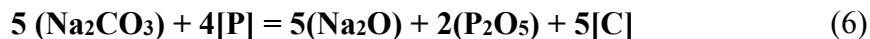
3.4.2 Odfosfoření taveniny v EIP přidáním Na_2CO_3

Pro odfosfoření vsázkového materiálu se dle námi zvoleného způsobu volila aplikace Na_2CO_3 do roztaveného kovu. Teplota taveniny nesměla překročit $1300^\circ C$. Důvodem je přechod P_2O_5 vázaného ve strusce, zpět do taveniny (viz obr. 11). Proto byla námi zvolena teplota v rozmezí $1220 - 1250^\circ C$.



Obr. 11 Graf procentuálního množství složek obsažených ve strusce po aplikaci 40 g/kg Na_2CO_3 po dobu 15 minut při teplotách 1250, 1350, 1450°C [13]

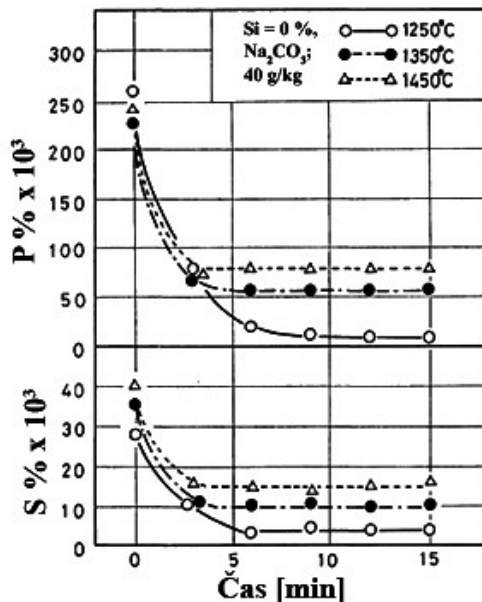
Chemickou reakcí (6) probíhá odfosfoření v tavenině, kdy Na_2O a P_2O_5 přechází ve formě oxidů do strusky a C zůstává v tavenině. Metoda předpokládá, že Na_2CO_3 působí jako ustalovací prostředek pro P_2O_5 ve strusce. Autoři výzkumu [13] potvrdili dostačující účinek odfosfoření pomocí Na_2CO_3 i při jedné aplikaci.



Z pozorování záznamů výzkumu [13] jsme zjistili, že po přidání Na_2CO_3 do taveniny následné roztavení doprovází silné vzplanutí produkující prach po dobu okolo 2 minut. Po této době následně přestává napěnění strusky a tavenina dosáhne rovnovážného stavu. Uvedené rovnice vyjadřují redukci Na_2CO_3 pomocí C v tavenině (7) a přechod určitého množství Na_2CO_3 do plynného stavu (8). [13]

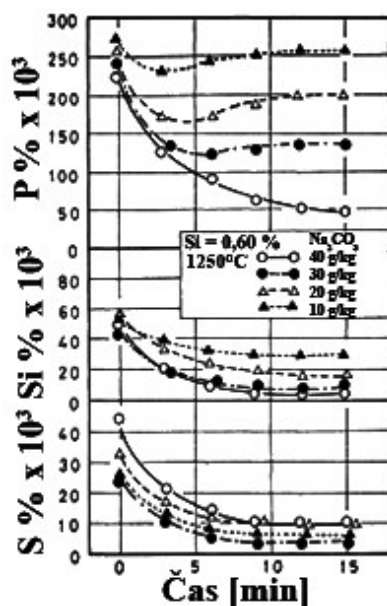


Pěnění strusky a doprovázející prach se zvyšuje s teplotou a snižujícím se obsahem Si. Při obsahu Si = 0 %, nastává odpaření strusky během cca 5 minut a bylo pozorováno částečné nalepení strusky na boční stěny kelímku EIP. Součástí výzkumu pana Moriy [13] bylo také potvrzení téze o vyšším účinku Na_2CO_3 při nižších teplotách pro odfosfoření a odsíření taveniny (viz obr. 12).



Obr. 12 Graf působení Na_2CO_3 (40 g/kg) na snižování procentuálního množství P a S v závislosti na čase při teplotách 1250, 1350, 1450°C [13]

Z výzkumu pana Moriy [13] je patrná závislost aplikovaného množství Na_2CO_3 pro snižování obsahu Si, S a P v tavenině s narůstajícím časem, při teplotě 1250°C (viz obr. 13).



Obr. 13 Graf snižování množství P, Si a S v tavenině za čas 15 minut při $T = 1250^{\circ}\text{C}$ při aplikování 10, 20, 30 a 40 g/kg Na_2CO_3 [13]

Společně s odfosfořením probíhá zároveň i odsiření, takže vstupní materiál může obsahovat množství S až 0,15 %, blížíci se vsázce při užití modifikátoru ve formě čistého Mg.

K úplnému rozpuštění Na_2CO_3 podle zdrojů dochází, po cca 20 - 30 minutách. Přidání Na_2CO_3 výrazně snižuje teplotu taveniny v rozmezí od 10 do 50 $^{\circ}\text{C}$, proto je vyžadován minimální výkon EIP, kvůli zamezení zchladnutí taveniny. Průběžně může být stahována struska, avšak předchozí výzkumy ukázaly, že se struska po vsypání Na_2CO_3 jeví silně tekutá, proto je nutností aplikovat po určité době prostředek na napěnění strusky pro snadnější odstranění.[13]

3.5 Nafosfoření taveniny

Dle výzkumu pana Moriy [13] je nutno snížit časovou prodlevu mezi aplikací Na_2CO_3 a odléváním výsledné LKG, která má za příčinu uvolňování P ze zbylé strusky zpět do taveniny procesem zvaným nafosfoření (9). [13]

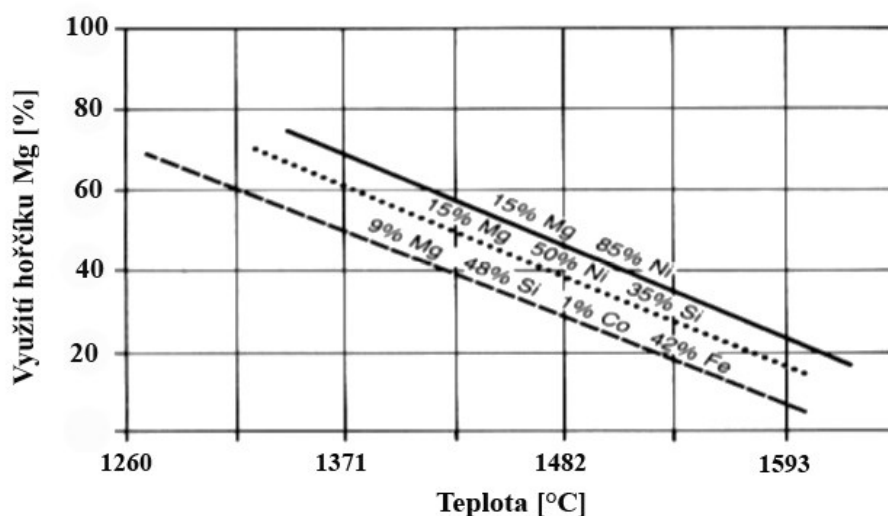


3.6 Modifikace

Konečný stav tvaru grafitu v LKG má za následek právě proces modifikace, při kterém se přidáním hořčíku do taveniny vytvoří nodulární tvar grafitu. Mg je současně prvkem karbidotvorným, proto kdybychom následně neaplikovali grafitizační očkovadlo výsledná struktura LKG by obsahovala karbidy, nebo bychom docílili ztuhnutí na bílou litinu. Proto se ve všech případech výroby LKG aplikuje jako první modifikátor, a poté očkovadlo. Pro snížení karbidotvorného účinku Mg je možné použít předslitinu obsahující cer Ce, popřípadě další kovy vzácných zemin KVZ.

Způsoby procesu modifikace můžeme rozdělit na:

- modifikaci hořčíkem Mg – Jako největší problém shledáváme nízkou teplotu varu 1107°C , jež je podstatně nižší než běžná teplota taveniny zhruba o 400°C . Tuto situaci však lze zvládnout využitím nuceného prostoje mezi aplikací modifikátoru a litím, určené ke snížení teploty taveniny, které brání propalu modifikátoru, ale hlavně pro plné využití funkce Mg pro modifikování (viz obr. 14).



Obr. 14 Využití Mg různých druhů modifikátorů v závislosti na teplotě [1]

Při aplikaci je nutno dbát na reakci styku tekutého kovu, jelikož je doprovázena bouřlivým hořením, kterému se snažíme zabránit aplikováním různých metod, viz 3.6.1 - 3.6.2 Metody modifikace, které umožňují postupný průnik k modifikátoru. Tlumivý účinek má ale také vápník, který při tom snižuje doznívající účinek hořčíku ve zpracované litině.

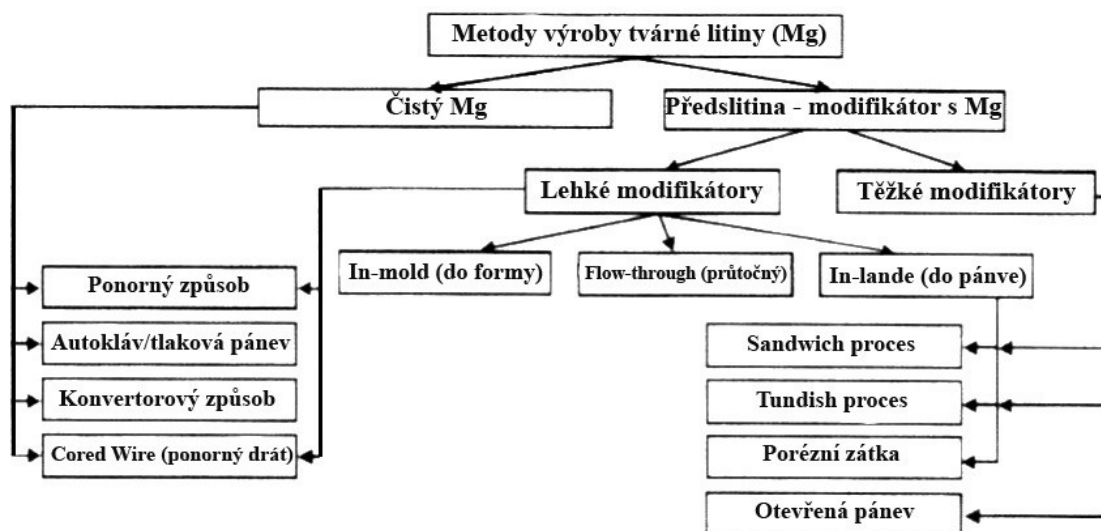
- modifikaci cerem Ce a předslitinami ostatních kovů vzácných zemin (KVZ). Při výrobě LKG hraje použití Ce a KVZ výraznou roli. První výhodou je možnost vlastních modifikačních účinků a již zmiňovaná neutralizace rušivých prvků. KVZ se využívají ve více modifikacích jako tzv. směsný kov, zvaný též Mischmetal. Jako hlavní přísada předslitin KVZ však dominuje Ce, a proto se dělí na předslitiny s nízkým, nebo vysokým obsahem (viz tab. 6).

Tab. 6 Chemické složení skupin sloužících jako předslitiny pro modifikaci pomocí Ce a KVZ [1]

Přibližné složení [%]			
Prvky - KVZ	Mischmetal	Skupina I.	Skupina II.
		KVZ s nízkým obsahem Ce	KVZ s vysokým obsahem Ce
Cer (Ce)	50	50	90
Lanthan (La)	25	33	5
Neodym (Nd)	16	12	2
Praseodym (Pr)	6	4	1
Samarium (Sm)	2	-	-
Yttrium (Y) a ostatní vzácné zeminy	1	1	2

- modifikaci vápníkem Ca – Celá řada sléváren po celém světě od této metody ustoupila, avšak v asijských zemích ve většině převládá. Metoda modifikace Ca je známá již od roku 1960, ale nenalezla uplatnění z důvodu tvoření karbidů při použití většího množství Ca a výskytu strusky po modifikaci ve velkém množství po celém objemu odlitku. Asijské slévárny dokládají tento postup jako velmi vhodný pro čistotu materiálu, převyšující svými výsledky modifikaci Mg. Důležitou podmínkou pro dodržení výsledné čistoty je nízký obsah Ca a Al ve výchozím materiálu, který způsobuje nárosty strusky na výlevkách pánví a dokonce tím i znesnadňuje odlévání. V předslitinách pro modifikaci převážně obsahující Mg nalezneme Ca také, jelikož jeho hlavní funkcí je zvyšovat počet grafitotvorných zárodků a zpomalovat reakci Mg.

Metody modifikace s užitím Mg pro výrobu LKG dělíme do dvou základních skupin, metod využívajících k modifikaci čistý Mg nebo jeho předslitin viz obr. 15. Ty se dále dělí do skupin, které pro finální odlévání využívají různé druhy licích pánví. Pro modifikaci LKG se využívá mnoho způsobů. V následující kapitole však budou popsány pouze základní metody. Ve své podstatě jsou všechny založeny na stejném principu, avšak postupem času došlo při využití totožného množství stejného druhu modifikátoru k jeho vyšší výtěžnosti. Tedy ke stavu kdy je využito větší množství Mg k reakci s taveninou. [1, 2, 15, 16, 17]



Obr. 15 Rozdělení metod výroby LKG [1]

3.6.1 Metody využívající čistý Mg pro modifikaci LKG

Ačkoliv je výtěžnost Mg v tomto případě nejvyšší, je doprovázena i řadou nevýhod viz tab. 7.

Tab. 7 Klady a zápory užívání čistého Mg jako modifikátoru pro výrobu LKG [1]

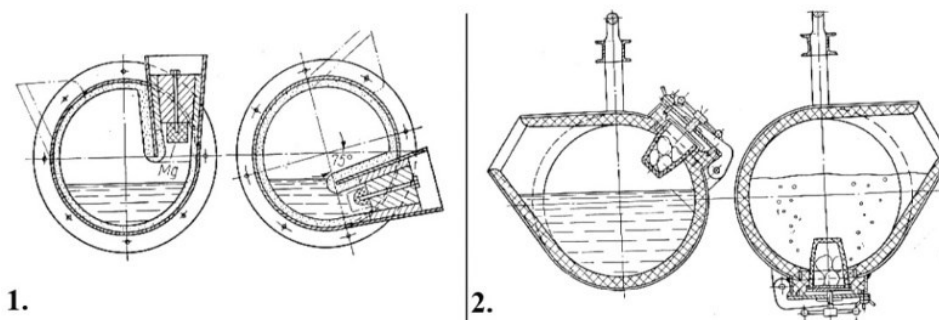
Klady	Zápory
<ul style="list-style-type: none"> odsíření může probíhat v téže zpracovací pánvi, proto je možná výroba v jakémkoliv tavicím agregátu, pokud je dostatečná teplota při odpichu nízký obsah Ca a Al snižuje tvorbu nadměrného množství strusky při udržování a během odlévání možnost využití vratného materiálu LKG, z důvodu absence prvků z hořčíkových předslitin nezvyšuje množství Si v tavenině oproti předslitinám FeSiMg 	<ul style="list-style-type: none"> nutná opatření k zajištění vysoké výtěžnosti Mg a zabránění doprovodných pyroefektů (bouřlivé reakce) nutné sekundární očkování před odléváním, z důvodu tvorby karbidů a sklonu k zákalkám

Ponorný způsob

Tato metoda byla jednou z prvních užitých při výrobě LKG. Lze aplikovat pomocí ponorného zvonu jakýkoliv typy modifikátoru, ale upřednostňují se čisté, nebo alespoň vysoce koncentrované. Během zpracování se zvon naplní potřebným množstvím modifikátoru a je ponořen do taveniny cca 50 mm ode dna pánve. Výťažnost Mg je vysoká a mnohdy dosahuje až 50 %. Dalšími výhodami jsou menší vývin plynů, menší vývoj strusek, díky vysoké čistotě Mg není obsaženo další množství škodlivých prvků a z tohoto plynoucí vyšší čistota výsledné LKG. Nevýhodou je vystavování zvonu vysokým teplotám.

Sklopná pánev

Způsob využívá rotační bubnové pánve, které jsou opatřeny zásobníkem, do kterého je vložena vysoce koncentrovaná Mg předslitina, nebo čistý Mg (viz obr. 16).



Obr. 16 Náskres modifikování pomocí rotační bubnové pánve – 1. a 2. případ fungují na totožném principu, s rozdílem umístění zásobníku modifikátoru [1]

Proces MAP

Proces funguje na principu ponořování modifikátoru do taveniny, s tím rozdílem, že dávkovaný materiál ve formě ingotů, je obalen žárovzdorným nánosem. Obalování probíhá zaražením betonového trnu do Mg ingotu, upevnění, a následuje pokrytí třemi vrstvami žárovzdorného námazku, pro tlumení bouřlivé reakce.

Metoda zavádění hořčíkových tyčí a drátů

Metoda je založena na postupném vsouvání čistého Mg ve formě tyče, nebo drátu do taveniny u dna zpracovací pánve. Tento postup napomáhá postupnému odpařování Mg.

Metoda plněných profilů

Předchozí zavádění modifikátoru bylo předlohou pro vývoj v současné době nejhojněji využívané metody plněným profilem. Důvody pro změnu jsou výrazná časová úspora, kladný postoj k sériové výrobě a možnost variantního řešení náplně. Jedinou nevýhodou je pořizovací cena dávkovacího aparátu a samotných plněných profilů. Ve slévárnách převážně vyrábějících odlitky z LKG má metoda rychlou návratnost financí.

3.6.2 Metody využívající Mg ve formě předslitin pro modifikaci LKG

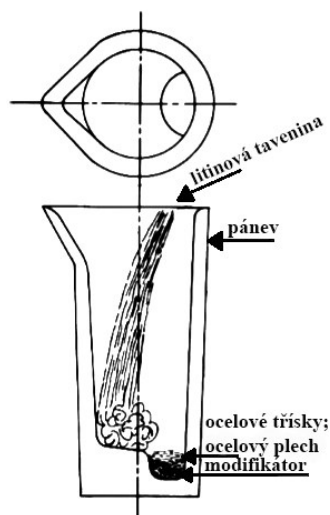
Výtěžnost Mg je v tomto případě v rozmezí od 15 do 50 % nižší než u čistého Mg, ale stále jsou tyto metody více využívanými díky své jednoduchosti a mnohem nižším nákladům. [1, 17]

Sandwich metoda

V malosériové výrobě a při laboratorních výzkumech nejhojněji využívaná metoda, kterou jsme aplikovali také na výrobu námi vytvořené LKG při využití klasické lící pánve s hubičkou a vypouklým dnem bez reakční komory.

Princip spočívá v přesném navážení Mg předslitiny spolu s grafitizačním očkovačem a následné vložení na dno předeřháté lící pánve do jamky zvané reakční komora (viz obr. 17). Její objem odpovídá potřebnému množství modifikátoru a grafitizačního očkovače, pro vytvoření množství LKG o něco menšího nežli je objem pánve. Povrch se zasype buďto ocelovými třískami, nebo děrovaným plechem z nelegované uhlíkaté oceli, kterými se zabrání již zmiňované bouřlivé reakci a vyššímu využití Mg, u předslitin FeSiMg8.

Delší styk Mg par s taveninou, větší ochlazování, přesycení taveniny u dna pánve a následné mísení s teplejší ještě nemodifikovanou taveninou, to vše umožní výtěžnost této metody bezmála 50 %. Důležité je dávkování množství taveniny pro dostatečnou modifikaci. [1]

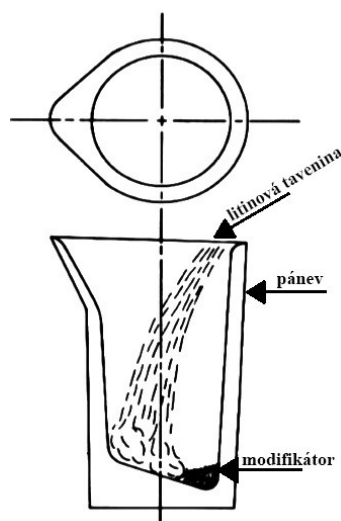


Obr. 17 Schématické znázornění připravené pánve pro modifikaci litinové taveniny polévací metodou Sandwich [1]

Otevřená pánev – polévací metoda

Nejlevnější a nejjednodušší polévací metoda, jejíž princip byl využit pro vynalezení zdokonalené, v předchozím odstavci zmíněné, metody Sandwich. Výťažnost Mg pouhých cca 25 % je u otevřené pánve zapříčiněna tvarem jejího dna (viz obr. 18), který znemožňuje úplný zásyp modifikátoru ocelovými pilinami.

Vyšší využití však umožňují modifikátory na bázi Ni a Cu, které může dosáhnout hodnoty až 70 %. Množství této předslitiny bude menší pro modifikaci stejného množství litinové taveniny než u FeSiMg_8 , ale ekonomičnost výroby shledává tuto variantu nepřipustnou. Kvůli vysoké pořizovací ceně a možnosti výroby LKG pouze s perlitickou maticí, nenachází ve slévárenské praxi příliš velké uplatnění. [1]

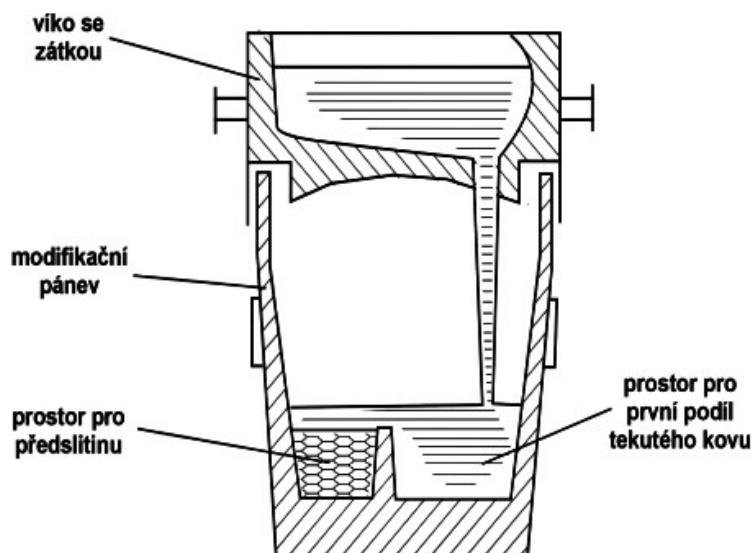


Obr. 18 Schématické znázornění připravené pánve pro modifikaci litinové taveniny polévací metodou [1]

Tundish metoda

Hlavním důvodem vytvoření nové metody, bylo zvyšování cen veškerých materiálů, proto bylo nutné zvýšit výtěžnost Mg, které bylo do té doby cca 50 %. Zvýšení hodnoty o 20%, které nabízí metoda Tundish, jen díky zabránění přístupu velkého množství vzduchu při modifikaci. Mg, který by reagoval s O_2 obsaženým ve vzduchu, nyní zůstává v tavenině a tím se zvyšuje jeho využití pro vlastní modifikaci.

Na dně pánve polévací metody systému Tundish – Cover je využit poznatek z metody Sandwich, ale reakční komora je zde vytvořena přepážkou, která odděluje prostor na dvě části určené pro dopad litinové taveniny a aplikování modifikátoru. Zásyp ocelových třísek je vyžadován v menším množství z důvodu pozvolného plnění pánve taveninou. Na pánev (viz obr. 19) je aplikováno odnímatelné víko se zátkou, které brání okolí před pyroefekty doprovázejícími veškeré metody modifikace. [1, 17]



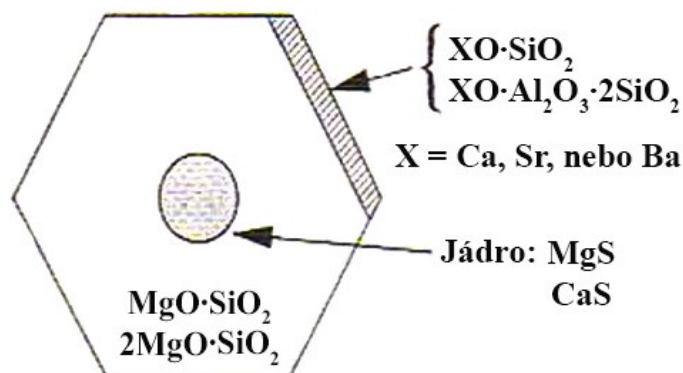
Obr. 19 Schématické znázornění pánve pro polévací metodu systémem Tundish - Cover [17]

3.7 Grafitizační očkování

Jak již bylo zmíněno v kapitole modifikace, bez grafitizačního očkování by v tavenině, po primárním očkování, převládal sklon k vylučování volného cementitu. Tvorba karbidů je však závislá ve velké míře také na průřezu stěn odlitku, proto u silnostěnných se volí dávkování očkovačů okolo 0,25 %, kdežto u tenkostěnných až 1 %. Dalším kritériem je také CE a obsah S, který při příliš nízkém zastoupení v tavenině vykazuje vyšší tvorbu. Proto by nemělo množství S klesnout pod hodnotu 0,007 %.

Princip grafitizačního očkovaní spočívá v zabezpečení dostatečného počtu grafitizačních zárodků při eutektické krystalizaci a tím se zabrání nejen karbidickému tuhnutí, ale podněcujeme tím i vznik maximálního počtu eutektických buněk a zrn grafitu. V některých případech napomáhá k dodatečnému zvýšení nodularity grafitu, tedy docílení tvaru kuličky. Veškeré zmíněné výhody nám zaručí co možná nejvyšší mechanické vlastnosti.

Krystalizační zárodky mají jádro tvořené sulfidy MgS , nebo CaS , jež jsou základními produkty modifikace. Díky velkému povrchovému napětí mezi grafitem a povrchovou obálkou jádra zárodku, tvořenou převážně křemičitany $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ nebo $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, je nemožné začít nukleaci. Pro zvýšení nukleačního účinku povrchové obálky je nutné přidání očkovaní FeSi75 , aby díky krystalizačně aktivním prvkům (vápník Ca , stroncium Sr a baryum Ba), vytvořila na povrchu vrstvu komplexních silikátů (viz obr. 20), které velmi silně podporují nukleaci grafitu. Obecně platí, že čím více je krystalizačních zárodků v tavenině, tím vzniká větší počet menších, pravidelně rozložených grafitových zrn ve struktuře LKG a tím menší je sklon k vylučování karbidů. Účinnost očkovačla však po určité době začíná klesat a ve struktuře se mohou opět objevovat primární karbidy a rozpadlý zrnitý grafit.



Obr. 20 Krystalizační zárodek grafitu [1]

Volba očkovačla vždy závisí na výchozím stavu zpracovávané litiny, avšak pro experimentální část této práce jsme aplikovali grafitizační očkovačlo na bázi ferosilicia FeSi75 , jež je zároveň nejvyužívanějším ve slévárenské praxi. Jednak pro svou výhodu po stránce ekonomické, tak pro vysoký obsah Si , bezmála 75 % a Ca dosahující hodnoty až 1 % (viz tab. 8).[1, 3, 6, 17]

Tab. 8 Chemické složení grafitizačních očkovaadel na bázi ferosilicia pro výrobu LKG [1]

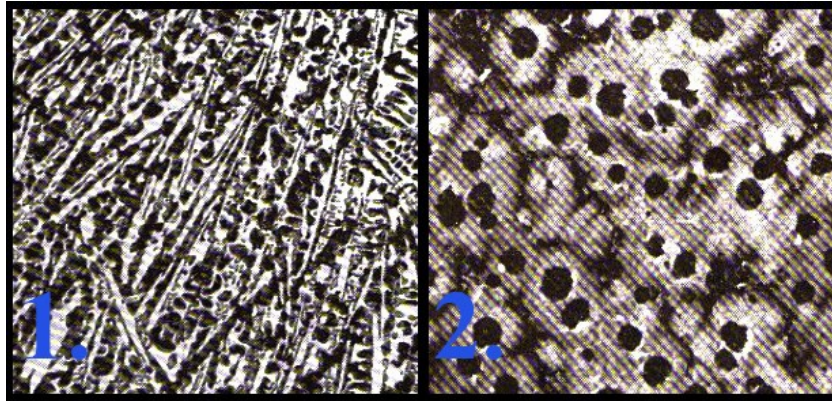
Typ očkovaadla	Obsažené prvky [%]							
	Si	Al	Ca	Ba	Zr	Mn	Mg	KVZ
75 % FeSi – Ca	75,0	0,6 – 1,25	0,6 – 1,0					
FeSi – Ba	60,0 – 75,0	0,5 – 1,7	0,8 – 2,0	0,8 – 11,0	0,2 – 6,0	0,2 – 10		
FeSi – Zr	80	1,5 – 2,5	2,5		1,5			
FeSi – Ce	45	0,5	0,5					3 – 13 Ce
45 % FeSi	45 – 50	0,8	0,8					
45 % FeSi – Mg	45 – 50	0,8	0,8				1,3	
FeSi – La	75	1,5						2,0 – 2,5 La

3.7.1 Metody grafitizačního očkování

Pro metodu, kterou provedeme u očkování litiny, platí pravidla, která jsou dána složením litiny, tloušťkou stěn odlitku, rychlostí tuhnutí a složením vlastního očkovaadla. Záleží tedy, zda využije možnosti očkovat litinu v pánvi (viz kapitola polévacích metod), nebo jej aplikujeme přímo do formy odlitku. Stále musí být bráno v potaz, že účinnost očkovaadla se s delší dobou působení snižuje. Proto se metody dělí na:

- grafitizační očkování v pánvi – Těto metody jsme využili při vytváření LKG v experimentální části. Nevýhodou je však větší výskyt karbidů ve výsledné struktuře, avšak při dostatečném snížení prostoje mezi očkováním a odléváním, lze této situaci předejít.
- opožděné grafitizační očkování v proudu taveniny – Umístění očkovaadla, jak již z názvu vyplývá, je v proudu taveniny při odlévání, nebo přímo ve formě. Výhodami této aplikace jsou rovnoměrné naočkování objemu taveniny, využití dostupných a ekonomických typů očkovaadel a možnost automatizace procesu. Oproti předchozí metodě je ve finální struktuře LKG zaznamenáno minimální množství karbidů a u odlitků do šířky stěny cca 25 mm je i větší počet grafitových zrn. Pro tuto metodu však není univerzitní slévárna vybavena.

- grafitizační očkovaní plněnými profily – K očkovaní taveniny slouží plněné profily, které jsou zaváděny do taveniny. Výhodou je absolutní vytvoření požadované matrice (viz obr. 21) bez jakýchkoliv primárních karbidů, což má za následek výrazné cenové ohodnocení profilů, které je hlavním důvodem, proč tato metoda pro grafitizační očkovaní LKG není jedinou na trhu. [1, 3, 17]



Obr. 21 Mikrostruktura LKG: 1. neočkovaná tavenina, modifikátor NiMg; 2. očkovaná tavenina plněným profilem s 0,067 % FeSi75 [3]

4. Experimentální část

Pro realizaci taveb pro experimentální část této DP byly využity jak EIP o možném objemu vsázky 100 kg, tak EIP o objemu 10 kg. Pro vedení taveb, bylo využito vsázkového materiálu dodaného společností AMEPO s.r.o. ve formě housek, které byly následně taveny a probíhala výroba LKG.

Při tavbách se pro kontrolu obsahu C a Si využívalo TA firmy Electro - Nite. Pro přesné stanovení množství veškerých prvků v LKG se využívalo chemické analýzy pomocí kvantometru.

Pro každou z taveb byla odlita tyč o průměru 30 mm a délce 250 mm, kde následně probíhalo oddělení potřebného kusu materiálu pro použití na metalografický rozbor a měření tvrdosti materiálu pomocí zkoušecího stroje dle Brinella. Zbylý materiál byl využit pro úpravu na zkušební tyče dle normy ČSN 42 0311 pro zkoušení v tahu.

4.1 Tavby určené optimalizaci navážky Na_2CO_3

Tyto tavby převážně sloužily k přesnému určení navážky Na_2CO_3 . Bylo stanoveno množství, které je schopno se v tavenině rozpustit a zároveň splnit účel, tedy snížit obsah fosforu P, abychom docílili požadovaného procentuálního množství.

Průvodním jevem při aplikaci Na_2CO_3 bylo navázání křemíku Si. LKG však ve finálním stavu musí obsahovat kolem 2,5 hm % Si, proto při zjištění nízkého obsahu prostřednictvím TA, musel být do taveniny dodatečně přidán Si ve formě FeSi75. Při těchto tavbách však šlo primárně o vytvoření vsázky s nízkým obsahem P a ne o finální LKG, proto množství Si bylo stanoveno na 1,5 hm %. Jelikož se počítá, že takto vytvořený vsázkový materiál bude následně pro výrobu LKG modifikován a očkovan, tudíž docházelo k dodatečnému dodání Si ve formě modifikátoru a očkovačla, samozřejmě s ohledem na procentuální množství prvků v nich obsažených.

Pro optimalizaci množství Na_2CO_3 byly vedeny celkově 2 tavby, avšak jen u první probíhalo aplikování plynného kyslíku O_2 , pro snížení P, manganu Mn a síry S, ačkoliv docházelo i ke snižování obsahu uhlíku C a křemíku Si. Pokud by docházelo k příliš velkému snižování C při uhlíkovém varu, byla připravena přísada C ve formě čistého grafitu, ale u tavby k této stěžejní situaci nedošlo. Aplikace Na_2CO_3 v dávkách probíhalo obdobně u obou taveb, avšak při rozdílných teplotách.

4.1.1 Tavba I. pro optimalizaci Na_2CO_3

Tavba probíhala na 100 kg EIP. Hmotnost vsazeného surového železa byla 68 kg. Předpokládaný procentuální podíl aplikované Na_2CO_3 byl 3 %, tedy 2,04 kg. K dávkování docházelo ve 3 etapách, kdy každá obsahovala 0,68 kg Na_2CO_3 . Při každé aplikaci se měřila teplota taveniny, jelikož nesměla překročit 1300°C , kdy je tato teplota hranicí pro úspěšné odfosfoření. Komplikací však byl výchozí obsah C 4,31 % a Si 0,7 % (viz tab. 9), proto pro jeho snížení bylo aplikováno 1 500 g nízkouhlíkové oceli, kdy došlo ke snížení o cca 10 % z původní hodnoty, tj. 3,88 % a 0,63 %. Výchozí obsah P však naznačuje materiál, který byl již před dodáním na obsah P upravován.

Tab. 9 Chemické složení vsázkového materiálu (Tavba I. pro optimalizaci Na_2CO_3)

C	Mn	Si	P	S
4,31	0,07	0,7	0,058	0,024

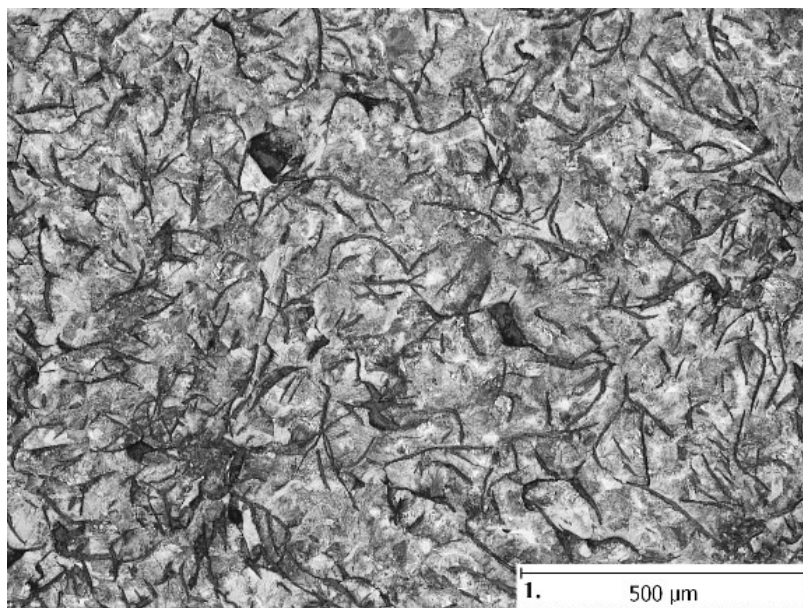
Před první dávkou Na_2CO_3 byl použit plynný kyslík O_2 . U této tavby bylo provedeno měření aktivity O_2 pomocí ponorné sondy firmy Electro – Nite, při teplotě $1488,2^\circ\text{C}$ 3,59 ppm a při teplotě 1425°C 1,77 ppm. Následné výsledky kvantometrického měření dokázalo snížení obsahu Mn o 3,7 % a P o 1,7 %.

První dávka Na_2CO_3 byla aplikovaná při $T = 1270^\circ\text{C}$, druhá při $T = 1290^\circ\text{C}$ po 10 minutové prodlevě. Obdobně tomu bylo i u třetí dávky.

Po otevření hladiny při zvýšeném výkonu pece, byla vždy po aplikaci Na_2CO_3 tavenina odlita při $T = 1420^\circ\text{C}$ do předem připravené formy ve všech třech případech. Z odlitých tyčí byly odděleny vzorky určené k metalografickému rozboru (viz obr. 22).

Výsledky chemického rozboru odpovídaly u 1. vzorku snížení P z původních 0,058 % o cca 9 %, u 2. vzorku vzhledem k původnímu množství se podařilo snížit o 13 %, avšak poslední třetí dávka jen o 17 %. Následkem nízkého snížení obsahu P, bylo zapotřebí zvýšit množství Na_2CO_3 .

Struktura vzorků vypovídá o lupínkovém tvaru grafitu, tedy jde o LLG s perlitickou maticí (viz obr. 22). Ve struktuře nebyly nalezeny zbytky nezreagované Na_2CO_3 , čili je možno tvrdit, že teplota taveniny při aplikaci Na_2CO_3 je správná a množství není nadměrné.



Obr. 22 Tavba I. pro optimalizaci Na_2CO_3 , LLG, grafit I 100, perlit 98, zv. 100 x, leptáno 4 % Nital

4.1.2 Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3

Tavba probíhala na 100 kg EIP. Hmotnost vsazeného surového železa byla 57 kg. Předpokládaný procentuální podíl aplikované Na_2CO_3 byl 4 %, tedy 2,28 kg. K dávkování docházelo ve 4 etapách, kdy každá obsahovala 0,57 kg Na_2CO_3 , a po otevření hladiny po dávkách 2., 3. a 4. byly do předem vytvořené formy odlity vzorky pro metalografický rozbor. Při této tavbě bylo aplikováno větší množství Na_2CO_3 s vynecháním O_2 . Výchozí stav vsazeného surového železa opět naznačoval již proběhlou úpravu pro snížení P (viz tab. 10).

Tab. 10 Chemické složení vsázkového materiálu (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3)

C	Mn	Si	P	S
4,27	0,07	0,67	0,057	0,024

Při $T = 1300^\circ\text{C}$ byly aplikovány dávky 1 % Na_2CO_3 v rozmezí 10 minut a do kokily odlity vzorky pro chemický rozbor (viz tab. 11 – 14).

Metalurgické zpracování vsázky pro jakostní litiny

Tab. 11 – Chemické složení taveniny po 1. dávce Na_2CO_3 (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3)

C	Mn	Si	P	S
4,25	0,07	0,53	0,054	0,019

Tab. 12 – Chemické složení taveniny po 2. dávce Na_2CO_3 (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3)

C	Mn	Si	P	S
4,23	0,06	0,46	0,053	0,015

Tab. 13 – Chemické složení taveniny po 3. dávce Na_2CO_3 (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3)

C	Mn	Si	P	S
4,11	0,05	0,31	0,050	0,013

Tab. 14 – Chemické složení taveniny po 4. dávce Na_2CO_3 (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3)

C	Mn	Si	P	S
4,09	0,03	0,11	0,030	0,008

Snížení obsahu C jen o 4,2 %, Mn o 57 %, ale hlavně Si o 84 % a P o 47,4 %, naznačuje výborné vlastnosti Na_2CO_3 jako odfosfořovadla a dokázalo, že ideálním množstvím pro dávkování do surového železa jsou 4 %.

Následná chemická analýza (viz tab. 15) však naznačuje, že při delším ponechání strusky, kde je soustředěný veškerý P, jež reagoval s Na_2CO_3 , dochází k pozvolnému přechodu P zpět do taveniny. Stahování strusky trvalo cca 25 minut, jelikož se vyskytuje v kašovitém stavu a je velmi obtížné ji urychleně stáhnout ihned po vsypání Na_2CO_3 . Výsledný obsah Si je dán aplikací 750 g FeSi75, ve snaze vytvořit tvárnou litinu.

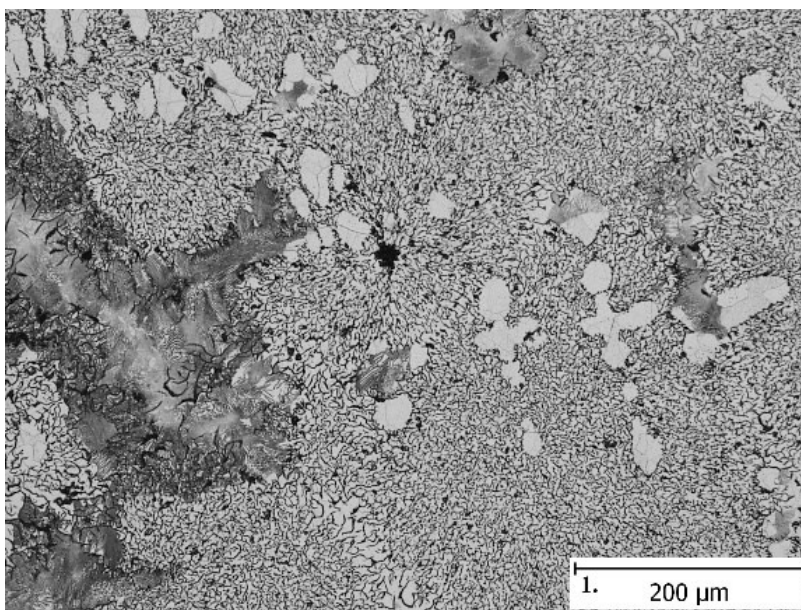
Tab. 15 Výsledné chemické složení odlitých vzorků pro metalografický rozbor (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3)

C	Mn	Si	P	S
4,00	0,04	0,96	0,033	0,008

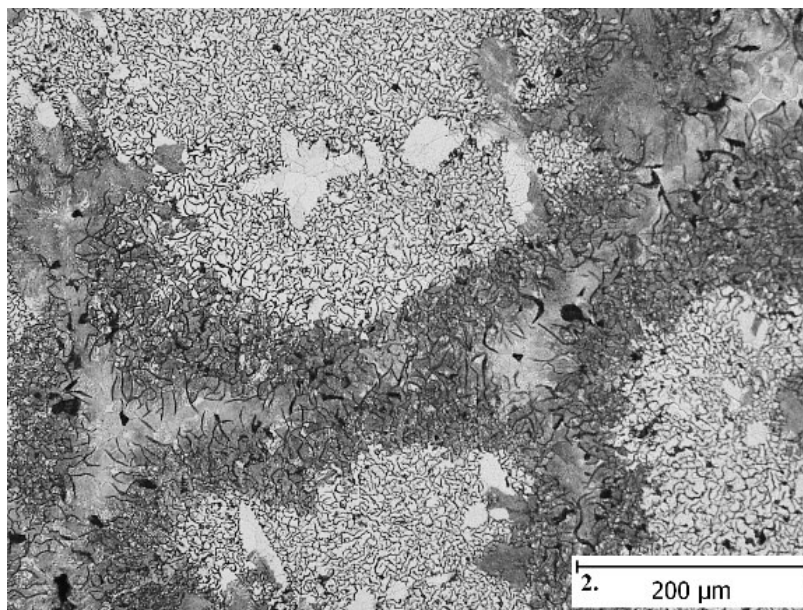
Metalografický rozbor všech 3 odlitých vzorků (viz obr. 23 - 25) naznačuje silně nehomogenní strukturu.

Na obr. 23 a obr. 24, tvoří lupínkový grafit růžicovitě shluky a můžeme sledovat i zvětšené feritické části, které mohou být způsobeny dozríváním očkovacího účinku. Průměrná mikrostruktura je 65 % feritu, 20 % perlitu a 10 % bodového grafitu. Matrice je feriticko - perlitická.

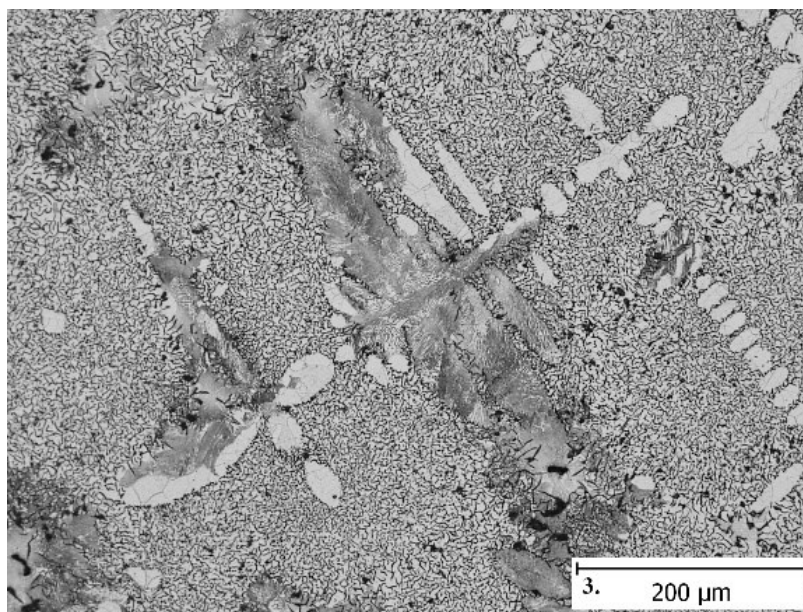
Matrice vzorku na obr. 25 vykazuje již větší podíl feritické fáze.



Obr. 23 Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3 , LLG, grafit I 100, ferit 70, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital (2 % Na_2CO_3)



Obr. 24 Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3 , LLG, grafit I 90, II 10, ferit 60, zv. 200 x,
leptáno 4 % Nital (3 % Na_2CO_3)



Obr. 25 Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3 , LLG, grafit I 100, ferit 60, zv. 200 x, leptáno 4 %
Nital (4 % Na_2CO_3)

4.2 Tavby pro výrobu tvárné litiny

Po zjištění ideální dávky Na_2CO_3 , která činila 4 hm % vsazeného materiálu, se mohlo dále pokračovat ve výzkumu výroby LKG. V této fázi se v rámci metalurgického zpracování vsázky aplikovala navíc i metoda plynného O_2 pro oxidaci P.

Díky předchozím tavbám bylo zjištěno, že při aplikaci Na_2CO_3 , dochází k pomalému rozpouštění v tavenině. K urychlení procesu se u většiny následujících taveb využíval systém přelévání taveniny z EIP do pánve. Docházelo ke snadnějšímu stahování strusky, ale v prvé řadě k intenzivnějšímu promísení kovu s Na_2CO_3 , nežli je tomu pouze elektrickými proudy v EIP. Vedlejším účinkem však bylo samozřejmé ochlazování kovu cca o 100°C , proto muselo přelévání probíhat v rámci několika sekund, aby nedošlo k poklesu teploty pod teplotu likvidu.

Po snížení P na požadovanou hodnotu a otevření hladiny taveniny, vždy probíhalo měření teploty, zda je materiál připraven pro lití. Během následující doby se na dno pánve aplikovalo předem domluvené množství modifikátoru a očkovačla, které bylo zasypáno dostatečným množstvím železných třísek, díky kterým nereaguje čelo proudu vytékajícího kovu jako první, ale k reakci dochází až při roztavení třísek, kdy je naplněna zhruba třetina jejího objemu. Pokud bylo dosaženo teploty lití, došlo k finálnímu stažení strusky a přelévání do pánve. V pánvi tekutý kov reagoval po dobu cca 30 sekund, poté mohlo dojít k lití předem naformovaných vzorků. Přebytek tekutého kovu se odléval do otevřených, jednodílných, ocelových kokil. Po dokončení všech taveb došlo k přetavení veškerých přebytečných housek.

Z každé tavby byly odlity vzorky ve tvaru tyčí o průměru 3 cm a délce cca 25 cm. Je nutné dodat, že tyto tyče byly primárně odlévány pro vzorky určené na metalografické zjištění struktury LKG a následné měření tvrdosti.

Z tyčí byly poté odebrány části určené pro zjištění struktury materiálu pomocí metalografického výbrusu a posloužil také pro měření tvrdosti dle Brinella. Zkouška probíhala na stroji firmy WPM, dle normy ČSN EN ISO 6506 – 1:2005, vztažené k měření tvrdosti materiálu dle Brinella HBW, kdy norma stanovuje pro měření tvrdosti kuličku vyrobenou z tvrdokovu. V našem případě šlo o kuličku o průměru 2,5 mm a působící síla byla 1839 N. Výpočty byly provedeny dle vzorce (10).

$$HBW = 0,102 * \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)} \quad (10)$$

F ... síla působící na materiál [N]

D ... průměr kuličky [mm]

d ... průměr vtisku v materiálu [mm]

Zbylý materiál byl využit pro výrobu zkušebních tyčí pro zjištění meze pevnosti, meze kluzu a tažnosti. Veškeré hodnoty jsou naměřeny trhacím strojem, avšak tažnost byla vždy přepočítána pomocí vzorce (11).

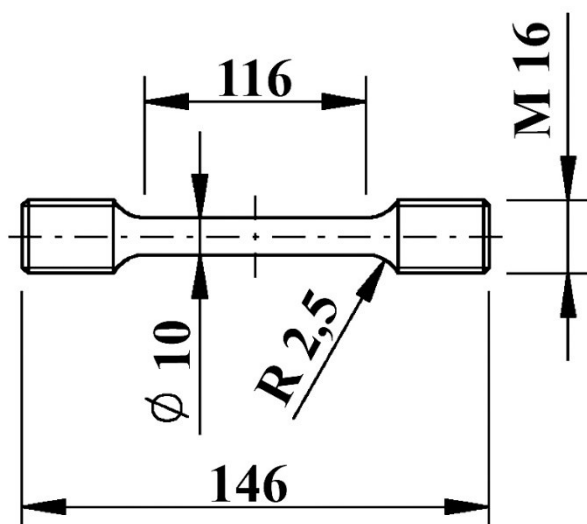
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (11)$$

A ... tažnost [%]

L_u ... výsledná délka přetrženého zkušebního vzorku [mm]

L_0 ... počáteční délka zkušebního vzorku [mm]

Tato metoda přišla v úvahu převážně pro měření pevnosti materiálu, jelikož k dosažení přesných výsledků tažnosti by byly vyžadovány oddělené lité vzorky Y, typ II. s tloušťkou spodní části 25 mm dle ČSN EN 1563, kdy vrchní část s úkosem funguje jako nálitek, a tak je pravděpodobnost vnitřních vad velmi malá. Opracování tohoto druhu vzorků je velmi složité, proto byly po domluvě s obráběčem kovů vytvořeny oddělené lité vzorky ve tvaru tyče o průměru cca 25 mm lité vertikálně. Námi naměřené hodnoty jsou pouze orientační, jelikož lom po přetržení opracovaných tyčí vykazoval známky přítomnosti sekundární strusky z modifikace, plynových vad, nebo staženin. Vady v odlitku jsou také způsobeny možným obsahem sekundární strusky a ostatních vměstků v objemu odlitku, jelikož námi využívaná lící pánev s horním odléváním, známá též jako pánev hubičková. Zkušební tyče kruhové se závitovými hlavami byly vyráběny dle normy ČSN 42 0311 - Zkušební tyče pro zkoušku tahem (viz obr. 26).



Obr. 26 Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku LKG dle normy ČSN 42 0311

4.2.1 Tavba I.

Tavba byla vedena na 100 kg EIP. Bylo vsazeno 32 kg surového železa, a dle předpokladu mělo být odlito cca 2 kg pro zkoušky do kokily pro kvantometr a TA. Chemického složení vsázky (viz tab. 16) opět vykazovalo úpravu množství P.

Lití probíhalo ve 2 fázích, kdy každá měla obsahovat 15 kg taveniny, podle čehož se řídila i navážka očkovačů a modifikátorů. Pro 1. lití bylo určeno očkovadlo FeSi75 v množství 0,7 %, tj. 105 g a modifikátor BIOMET v 0,8 %, tj. 120 g. Pro 2. lití FeSi75 také 0,7 %, ale BIOMETU 0,6 %, tj. 90 g.

Tab. 16 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba I.; 1. lití; 2. lití)

C	Mn	Si	P	S
4,26	0,07	0,69	0,06	0,025

U této tavby bylo stanoveno přidání 4 hm % Na_2CO_3 , ale ne ve čtyřech fázích, nýbrž při $T = 1220^\circ\text{C}$ aplikovat celé množství 1,28 kg naráz. Počet přelití závisel na množství strusky a možnostech jejího stažení. Pro úplné odstranění bylo zapotřebí třech přelití. K usnadnění jsme využili také prostředek pro napěnění strusky.

Po stažení strusky se přidaly do taveniny 2 hm. % FeSi75 pro zvýšení celkového množství Si (viz tab. 17) na požadovanou hodnotu před modifikací a očkováním.

Tab. 17 Chemické složení taveniny před modifikací a očkovaním (Tavba I.)

C	Mn	Si	P	S
3,74	0,06	1,55	0,053	0,006

Přepočet dávkování modifikátoru a očkovačla byl proveden na reálně zvážené hmotnosti taveniny. V pánvi bylo odlito při 1. lití 19 kg, a u 2. lití 11 kg. Proto se poměr FeSi75 a BIOMETU změnil (viz tab. 18) a u 1. lití se předpokládalo malé množství modifikátoru a očkovačla, z čehož bude malé množství grafitů, které nedosáhnout požadovaného kuličkového tvaru. Pro 2. lití byla tavenina přemodifikovaná, proto měla předpoklad vyššího obsahu Si a Mg a špatné struktury.

Tab. 18 Přepočet navážky FeSi75 a BIOMETU pro 1. a 2. lití (Tavba I.)

	1. Lití				2. Lití			
	Předpokládané množství		Přepočtené množství		Předpokládané množství		Přepočtené množství	
	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]
FeSi75	0,7	105	0,55	105	0,7	105	0,96	105
BIOMET	0,8	120	0,63	120	0,6	90	0,82	90

Výsledný chemickým složením, kde množství Si bylo 0,008 % a P 0,057% (viz tab. 19), předpoklad potvrdil. Výsledné množství P je jen o 5 % nižší než ve výchozím stavu, ale očkování proběhlo v pořádku vzhledem k množství Si 2,47 % pro LKG ideální.

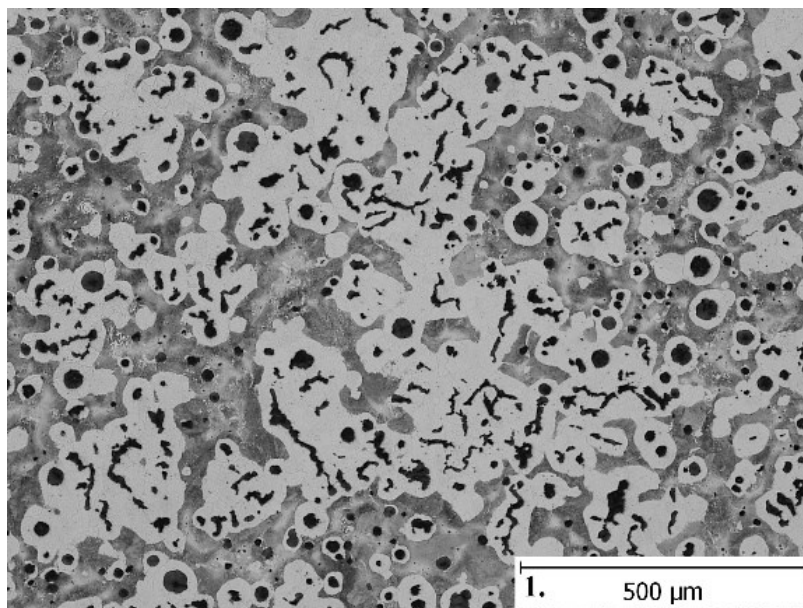
Tab. 19 Výsledné chemické složení LKG (Tavba I.; 1. lití)

C	Mn	Si	P	S
3,42	0,08	2,47	0,057	0,008

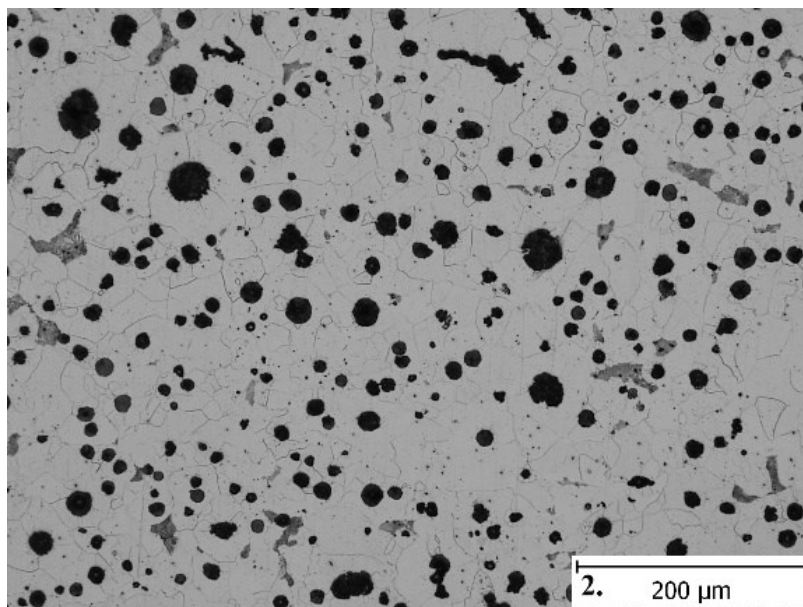
Při 1. lití (viz obr. 27), můžeme pozorovat nízký počet grafitu na mm², způsobený nízkým množstvím očkovačla. Pokles počtu nukleačních zárodků je často provázen degenerací zrn grafitu. Právě díky tomu a zároveň i nedostatečného množství modifikátoru, vidíme ze 70 % výbrusu tvar grafitu červíkovitého typu. Z tohoto důvodu můžeme označit jako LČG s matricí feriticko – perlitickou a předpokládat nízké mechanické vlastností (viz tab. 20). Předpoklad nízké tažnosti se potvrdil, avšak hodnota 7,6 % je překvapivě vysoká.

Naopak pevnost v tahu 420 MPa byla předpokládána díky vysokému podílu perlitické matrice a množství grafitu.

Při sledování výbrusu 2. lití se naopak jeví rozbor jako LKG s výbornou nodularitou grafitu s občasným červíkovitým tvarem (viz obr. 28). Můžeme tedy hovořit o výborné výsledné struktuře pro LKG s plně feritickou matricí, avšak tažnost, jež je požadovaná alespoň 15 %, je u toho vzorku nižší o 63 %, proto se jako důvod nabízí pouze způsob vytvoření odděleně litých vzorků.



Obr. 27 Tavba I.; 1. lití, LČG, grafit III 80, VI 20, ferit 40, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital



Obr. 28 Tavba I.; 2. lití, LKG, grafit VI 100, ferit 90, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital

Tab. 20 Mechanické vlastnosti LKG z 1. a 2. lití (Tavba I.; 1. lití; 2. lití)

Pořadí odlévání	Smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]	Tvrdost HBW
1.	200,5	419,9	7,6	190,0
2.	214,1	377,2	5,6	161,0

4.2.2 Tavba II.

Tavba byla vedena na 100 kg EIP. Vsazeno bylo 40 kg surového železa, a dle předpokladu mělo být odlito cca 2 kg pro chemickou analýzu a TA. Chemického složení vsázky (viz tab. 21) již nevykazovalo úpravu množství P před dodáním, a jeho obsah byl 0,127 %, avšak obsah S byl od předchozího dodaného materiálu nižší o 66 %.

Lití probíhalo ve 2 fázích, kdy každá měla obsahovat 15 kg taveniny, podle čehož se řídila i navážka očkovačla a modifikátoru. Pro obě lití bylo určeno množství FeSi75 0,9 hm. % tedy 135 g, avšak BIOMET byl stanoven pro 1. lití 1,0 %, 150 g a pro 2. lití 0,7 %, 105 g.

Tab. 21 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba II.; 1. lití; 2. lití)

C	Mn	Si	P	S
4,00	0,41	0,65	0,127	0,011

Přepočet dávkování modifikátoru a očkovačla byl opět proveden na reálně zvažené hmotnosti taveniny. Pro první lití bylo odděleno 20 kg a pro druhé 17 kg, kvůli čemuž došlo ke změně procentuálního podílu očkovačla a modifikátoru BIOMET (viz tab. 22).

Tab. 22 Přepočet navážky FeSi75 a BIOMETU (Tavba II.; 1. lití; 2. lití)

	1. Lití				2. Lití			
	Předpokládané množství		Přepočtené množství		Předpokládané množství		Přepočtené množství	
	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]
FeSi75	0,9	135	0,68	135	0,9	135	0,79	135
BIOMET	1,0	150	0,75	150	0,7	105	0,62	105

Po vsypání Na_2CO_3 , se podíl P v tavenině snížil o 80 %, a to bez přelévání pro lepší promíchání taveniny. Zjištěná doba nutná k samovolnému rozpuštění 4 % množství a tedy i otevření hladiny je cca 33 minut. Což značí značnou výhodu přelévání do pánve a zpět do EIP, pro urychlení tohoto procesu.

Kvůli nízkému obsahu Si (viz tab. 23), bylo nutné aplikovat množství FeSi75, pro zvýšení alespoň na hodnotu 1,5 %.

Tab. 23 Chemické složení taveniny po vsypání Na_2CO_3 (Tavba II.)

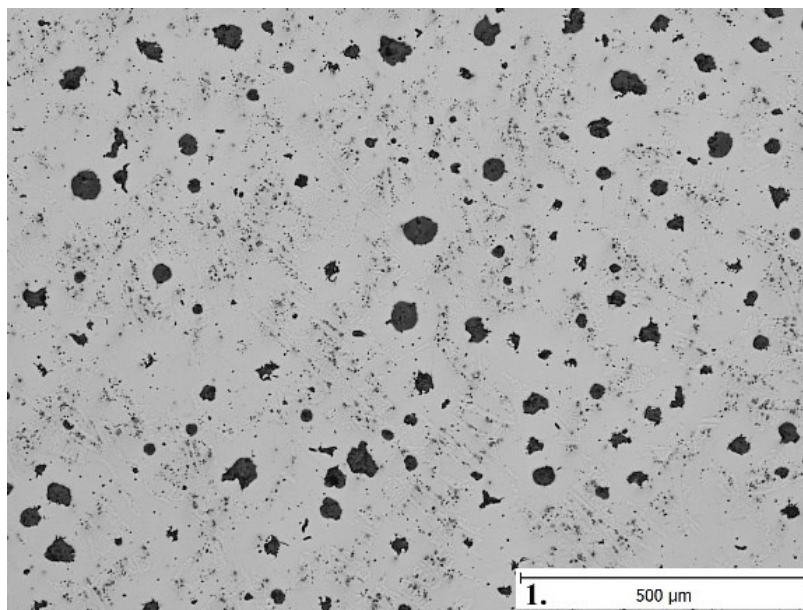
C	Mn	Si	P	S
3,86	0,12	0,07	0,025	0,004

Problém však nastal po nalití taveniny do lící pánve, kde se po ukončení bouřlivé reakce s modifikátorem, začala tavenina prudce chladnout. Ačkoliv jsme prováděli 2 lití, nečekaná situace proběhla u obou. Z toho důvodu nebylo možné odlít vzorek do kokily pro zjištění chemického složení. Po snaze odlít co nejrychleji veškerou LKG do předem připravených kokil, zůstalo cca 1,5 kg na stěnách lící pánve ovšem s nepředpokládaným zbarvením. Světle zelená barva naznačovala nedokončenou reakci Na_2CO_3 s taveninou.

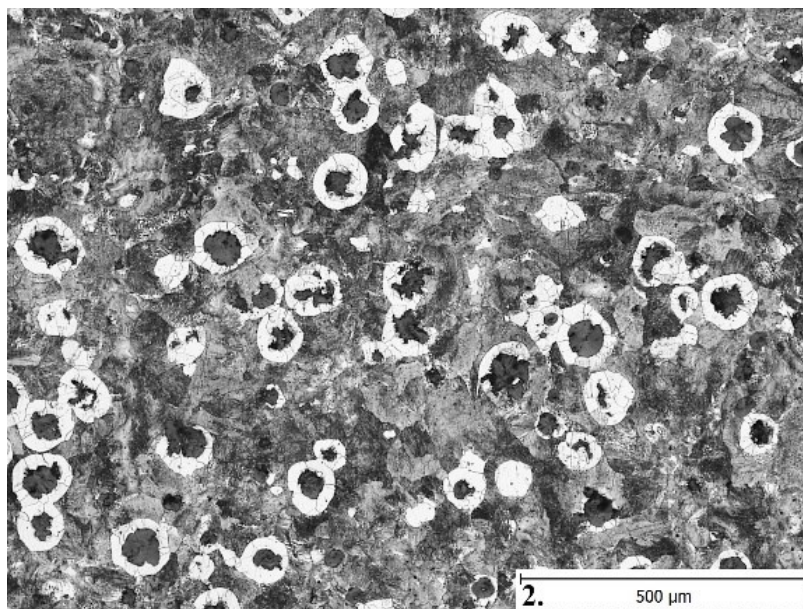
Ve snaze odlít zkušební tyče, se podařilo odebrat vzorky vhodné alespoň pro metalografický rozbor.

Struktura vzorku prvního lití byla z hlediska množství dobrá, avšak tvar grafitu měl sníženou nodularitu kvůli nižšímu množství zbytkového hořčíku. Nerovnoměrné rozdělení grafitu je způsobeno sníženým množstvím FeSi75 (viz obr. 29).

U druhého lití je struktura obdobná, avšak vyšší podíl modifikátoru a množství taveniny, blížíci se předpokladu, způsobil tvar grafitu s vyšší nodularitou a dostatečné množství FeSi75, zabránilo vzniku karbidických fází. Převládá perlitická fáze, s feritickými ohrazením kolem grafitu, proto je předpoklad vysoké pevnosti a tvrdosti správný (viz obr. 30). Materiál není vhodný pro výrobu kokil, avšak metoda odfosfoření vychází jako velmi účinná. K defektům však podle této zkušenosti dochází, pokud se tavenina při reakci s Na_2CO_3 ponechá v klidném stavu. Aplikace přelévání přichází v tomto případě odfosfoření jako nutnost.

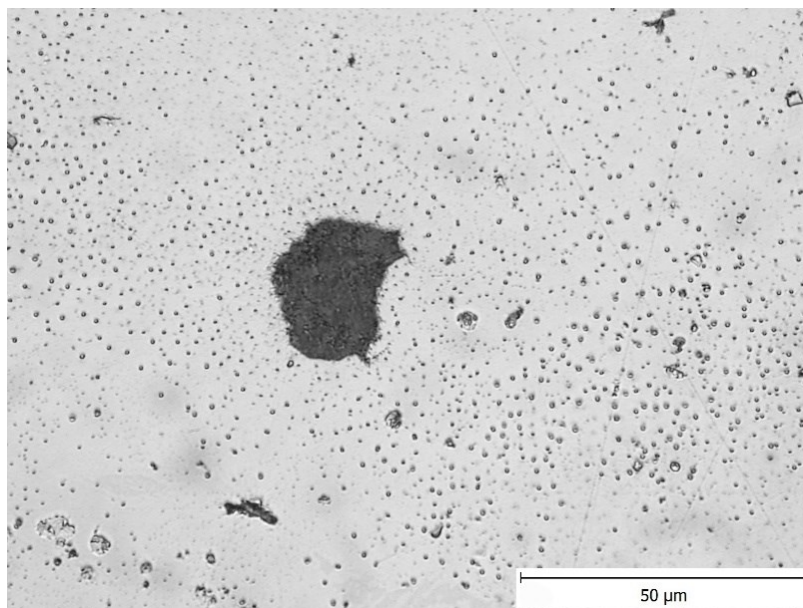


Obr. 29 Tavba II.; 1. lití, LKG, grafit VI 90, zv. 200 x, neleptáno



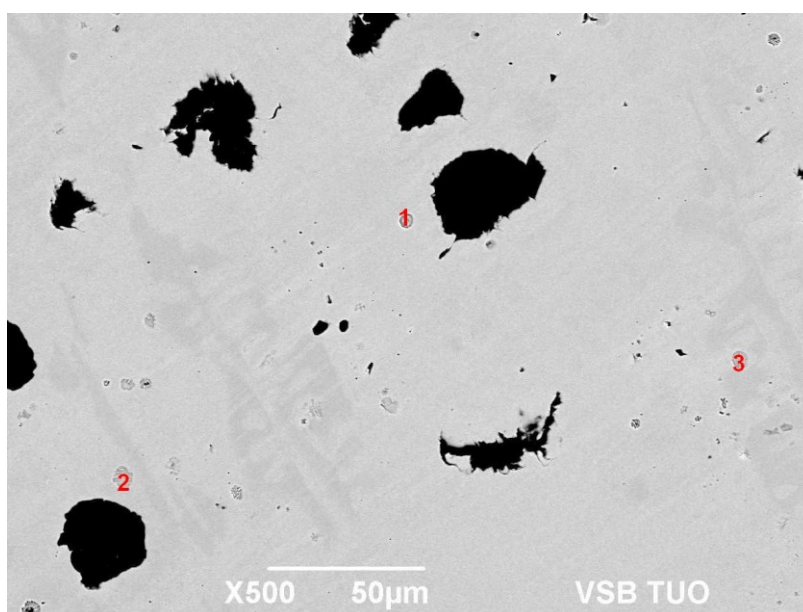
Obr. 30 Tavba II.; 2. lití, LKG, grafit VI 90, V 10, ferit 15, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital

Při rozboru metalografických vzorků, byl opět pozorován defekt (viz obr. 31), který byl námi doposud posuzován jako nedostatečné vysušení vzorku po úpravě pro sledování na mikroskopu. Protože výskyt při této tavbě u obou vzorků byl nad míru vysoký. Bylo nutné zjistit jejich složení, kvůli podezření nezreagované Na_2CO_3 , jež by se v tomto případě mohlo vyskytnout, z důvodu nízké lící teploty a světle zelené barvy na povrchu tuhoucích housek v kokilách.



Obr. 31 Tavba II.; 1. lití, LKG, grafit VI 100, zv. 1 000 x, neleptáno

Předem stanovená predikce možnosti vnitřní vady byla však mylná. Po zkoumání na rastrovacím elektronovém mikroskopu REM, jsme při podrobném rozboru (viz obr. 32) vzorku, vybrali 3 místa, a provedli výzkum chemického složení. Chemickým složením (viz tab. 24) vykazovaly místa s vysokým obsahem Fe a jistým množstvím Si, čili podezření z nerozpuštěné Na_2CO_3 bylo zbytečné, jelikož veškerý obsah se vždy rozpustí a možná nezreagovaná část přechází do strusky. Při přiblížení vybraných třech míst na vzorku, jsme určili jejich struktury jako perlitickou složku s minimálním obsahem eutektika.



Obr. 32 Tavba II.; 1. lití, LKG, grafit VI 70, V 30, zv. 500 x, neleptáno 4 % Nital (REM)

Tab. 24 Chemický rozbor – bodová analýza bodů 1, 2, 3 na REM snímku viz obr. 32

Pořadí bodů dle obr. 32	Bodová analýza [%]	
	Si	Fe
1.	2,36	97,65
2.	2,35	97,65
3.	1,97	98,03

4.2.3 Tavba III.

Tavba III. byla vedena na 100 kg EIP. Vsazeno bylo 43 kg surového železa za předpokladu, že cca 3 kg budou využity pro zkoušky do kvantometru a TA. Chemického složení vsázky (viz tab. 25) bylo obdobné jako pro tavbu II.

Lití mělo probíhat ve 2 fázích, kdy každá měla obsahovat 20 kg taveniny. Navážka očkovačla byla stanovena pro obě lití, FeSi75 0,9 hm. % tedy 180 g, a modifikátoru BIOMET pro 1. lití 1,2 %, 240 g a pro 2. lití 0,9 %, 180 g.

Tab. 25 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba III.)

C	Mn	Si	P	S
3,93	0,50	0,6	0,134	0,014

Kvůli vysokému obsahu P ve výchozím materiálu, jsme předpokládali množství 4 hm. % Na_2CO_3 příliš nízké. Chemický rozbor vzorku odlitého po vsypání Na_2CO_3 (viz tab. 26), potvrdil domněnku, proto jsme po domluvě aplikovali další 4 hm. %, pro potvrzení neschopnosti taveniny vstřebat dvojnásobné množství Na_2CO_3 .

Tab. 26 Chemické složení surového železa po přidání 1. dávky Na_2CO_3 (Tavba III.)

C	Mn	Si	P	S
3,87	0,39	0,19	0,083	0,002

Po 40 minutách však bylo jasné, že celkové množství 8 hm. % vsazeného Na_2CO_3 , bylo příliš vysoké a nebyl schopen v tavenině zreagovat. Proto byla tavba zrušena a tavenina složitě odlita do kokil. Po vychladnutí EIP a lící pánve byla na povrchu silná vrstva černo zelené strusky, která bezpochyby obsahovala vysoké množství Na_2CO_3 .

4.2.4 Tavba IV.

Tavba byla vedena na 10 kg EIP. Přechod ze 100 kg EIP je možno odůvodnit, možnostmi přesnější navážky modifikátoru a očkovadla. Vsazeno bylo 12 kg surového železa, a dle předpokladu mělo být odlito cca 2,5 kg pro zkoušky do kokily na kvantometr a TA. Chemického složení vsázky (viz tab. 27), představovalo ideální stav pro výrobu LKG a nutnost snížit P, který při 0,129 %, tvořil standartní množství vysokopecního železa.

Množství očkovadla bylo pro tuto tavbu stanoveno pro vytvoření vhodné LKG 0,8%, což činí 76 g, a modifikátoru 1,1 %, tedy 104,5 g.

Tab. 27 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba IV.)

C	Mn	Si	P	S
4,01	0,39	0,63	0,129	0,011

Pro primární snížení P, bezmála 6 %, jsme opět vybrali použití plynného O₂. Celkově proběhlo 5 x po dobu jedné minuty s mírnými prostoji, z důvodu zvýšení teploty o cca 35°C při každém aplikaci. Chemické složení (viz tab. 28), ukazuje tuto metody před odfosfořením Na₂CO₃ výhodnou, pro vsázkové materiály s větším obsahem P (viz tavba III.). Nepříznivé jsou pak, snižování obsahu C při uhlíkovém varu a pyroefekty doprovázející reakci. Z toho důvodu je nutné dodat C ve formě nauhličovadla, v našem případě čistého grafitu s obsahem C cca 99,5 %.

Tab. 28 Chemické složení taveniny po použití O₂ (Tavba IV.)

C	Mn	Si	P	S
3,70	0,13	0,17	0,122	0,009

Po přidání 4 hm. % Na₂CO₃, pro přepočítané množství taveniny (9,5 kg) po odebrání TA a vzorku pro zjištění chemického složení, tedy 380 g, jsme tento způsob odfosfořování shledali, díky snížení množství P o 94 %, opět velice účinným (viz tab. 29). Ovšem obsah Si byl natolik nízký, že muselo dojít k aplikování 140 g FeSi75 ještě do EIP, pro zvýšení na hodnotu alespoň cca 1,5 % (viz tab. 30), kvůli požadovanému množství Si ve výsledném stavu LKG cca 2,6 %.

Tab. 29 Chemické složení po přidání 4 hm. % Na_2CO_3 (Tavba IV.)

C	Mn	Si	P	S
3,61	0,11	< 0,01	0,008	< 0,001

Tab. 30 Chemické složení litinové taveniny před modifikací a očkováním, přidání FeSi75, pro zvýšení Si alespoň na hodnotu 1,5 % (Tavba IV.)

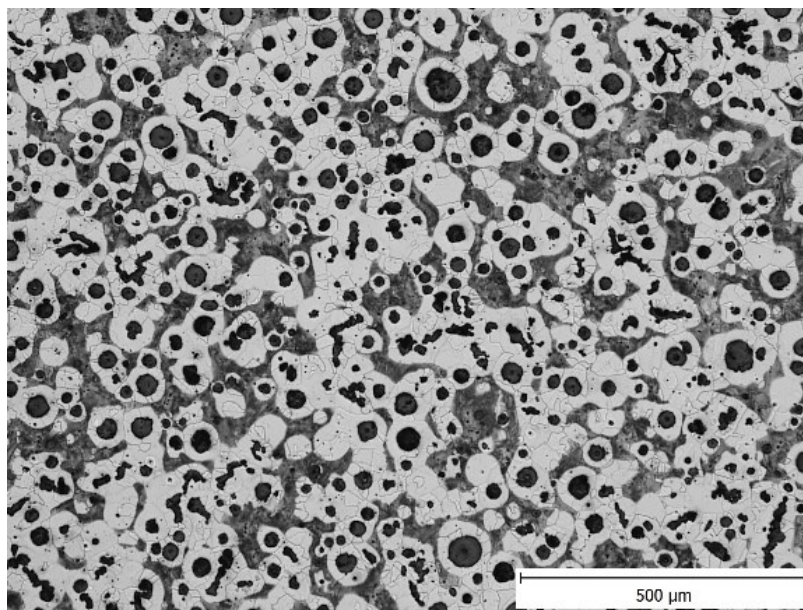
C	Mn	Si	P	S
3,61	0,17	1,61	0,026	0,002

Výsledné chemické složení (viz tab. 31)námi vytvořené LKG ve všech bodech splňuje potřebná množství všech prvků. Opět se však objevuje uvolňování P z P_2O_5 obsaženého ve strusce, kvůli časovému prostoji, který je ale nezbytný pro stažení strusky a rozpuštění Na_2CO_3 . Celkové snížení P od počátku tavby je 78,3 %.

Tab. 31 Chemické složení výsledného stavu LKG (Tavba IV.)

C	Mn	Si	P	S
3,36	0,20	2,72	0,028	0,003

Mikrostruktura vykazuje přítomnost kuličkového a do 20 % červíkovitého grafitu. Matrice je feriticko – perlitická (viz obr. 33), bez jakékoliv známky vytvořených karbidických fází. Tyto výsledky představují výborný očkovací a modifikační účinek použitých prostředků. Spolu s chemickým rozbohem, můžeme v tomto případě hovořit o vytvoření LKG vhodné pro výrobu kokil, kdy se pro čistý a odfosfořený vsázkový materiál využilo vysokopecní železo, které bylo nutno upravit vhodným metalurgickým zpracováním, jehož základem je metoda převážně využívající Na_2CO_3 .



Obr. 33 Tavba IV., LKG, grafit VI 82, III 18, ferit 65, zv. 100 x, leptáno 4 % Nital

Tažnost je pouhých 7,6 % (viz tab. 32), avšak jak již bylo zmíněno, problém je ve způsobu výroby odděleně litých vzorků. Tvrdost a pevnost v tahu jsou dle normy ČSN EN 1563.

Tab. 32 Mechanické vlastnosti LKG (Tavba IV.)

Pořadí odlévání	Smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]	Tvrdost HBW
1.	250,9	488,4	7,6	214

4.2.5 Tavba V.

Tavba byla vedena na 10 kg EIP. Vsazeno bylo 12 kg surového železa, a dle předpokladu mělo být odlito cca 2,5 kg pro zkoušky do kokily na kvantometr a TA. Chemické složení vsázky (viz tab. 33), bylo ideální s množstvím P 0,124 %.

Množství očkovačla bylo pro tuto tavbu stanoveno pro vytvoření vhodné LKG 0,9%, což činí 85 g, a modifikátoru 1,1 %, tedy 104 g, pro přepočítané množství taveniny (9,44 kg) po vzorků.

Metalurgické zpracování vsázky pro jakostní litiny

Tab. 33 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba V.)

C	Mn	Si	P	S
3,92	0,37	0,55	0,124	0,009

Způsob primárního odfosfoření taveniny proběhl opět pomocí použití plynného O₂, kdy bylo zaznamenáno snížení P o 12 % (viz tab. 34) z původní hodnoty.

Tab. 34 Chemické složení vsazeného surového železa po 2 aplikaci plynného O₂ (Tavba V.)

C	Mn	Si	P	S
3,67	0,15	0,19	0,109	0,007

Následovalo odfosfoření hlavním způsobem, přidáním 4 hm. % Na₂CO₃, a dvě přelití do pánve a zpět do EIP, pro urychlení promíchání taveniny, rozpuštění Na₂CO₃ a snížení prostoje, jak již bylo dokázáno v předchozích tavbách.

Snížení P pomocí námi stanovených operací pro metalurgické zpracování vsázky, bylo opět úspěšné. S hodnotou, po přidání 4 hm. % Na₂CO₃, nižší o 70 % (viz tab. 35) původního stavu, jsme docílili potvrzení veškerých kroků metody.

Tab. 35 Chemické složení po přidání 4 hm. % Na₂CO₃ a 2 přelitích (Tavba V.)

C	Mn	Si	P	S
3,56	0,11	0,03	0,037	0,002

Opět došlo také ke snížení množství Si, proto přidání FeSi75 vedoucí ke zvýšení hodnoty prodlužuje prostoj a hrozí navrácení určitého množství P nazpět do taveniny. Což se následně potvrzuje v tab. 36., kde hodnota vzrostla o 8 % vzhledem k výchozí hodnotě.

Tab. 36 Chemické složení před modifikací a očkováním, přidání FeSi75, pro zvýšení Si alespoň na hodnotu 1,5 % pro výrobu LKG (Tavba V.)

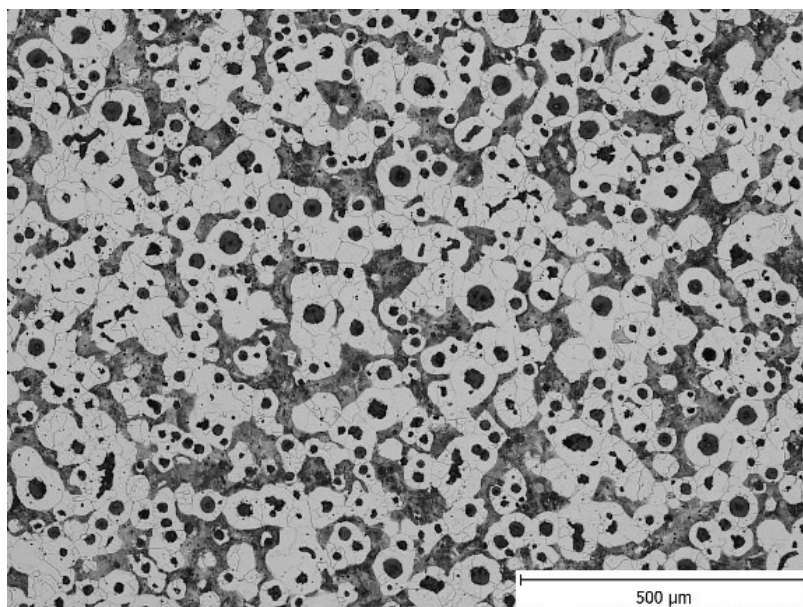
C	Mn	Si	P	S
3,49	0,17	1,53	0,047	0,002

Po odlití hotové LKG, je naměřena hodnota 0,049 % P (viz tab. 37). Což vypovídá o celkovém snížení od výchozího stavu o 60,5 %. Proto sledujeme přechod P ze strusky zpět do taveniny (cca 9,5 % výchozího stavu) během nuceného prostoje stahování strusky a upravování obsahu Si jako zanedbatelný.

Tab. 37 Chemické složení výsledného stavu LKG (Tavba V.)

C	Mn	Si	P	S
3,33	0,20	2,71	0,049	0,003

Mikrostruktura LKG (viz obr. 34) zobrazuje dostatečné množství grafitu, s poměrně rovnoměrným rozložením a dobrou nodularitou. Struktura feriticko – perlitická splňuje námi stanovené požadavky LKG pro výrobu kokil.



Obr. 34 Tavba V., LKG, grafit VI 100, ferit 70, zv. 100 x, leptáno 4 % Nital

Mechanické vlastnosti nejsou v souladu s normou ČSN EN 1563 (viz tab. 38), z důvodu již zmiňovaného nedodržení výroby odděleně litých vzorků, avšak tvrdost a pevnost jsou uvěřitelné, a pro LKG také velice pravděpodobné.

Tab. 38 Mechanické vlastnosti LKG (Tavba V.)

Pořadí odlévání	Smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]	Tvrdost HBW
1.	264,2	364,5	2,33	193

4.2.6 Tavba VI.

Tavba VI. byla vedena za účelem závěrečného ověření funkčnosti námi stanovené metody pro metalurgické zpracování vysokopecního železa jako vsázkového materiálu, u kterému je zapotřebí vytvořit potřebnou čistotu snížením obsahu P v EIP, pro výrobu LKG.

Probíhala na 10 kg EIP. Vsazeno bylo 12 kg surového železa, a dle předpokladu mělo být odlito 1,05 kg pro zkoušky do kokily na kvantometr a TA. Chemické složení vsázky (viz tab. 39) mělo přiměřenou hodnotu P 0,124 %, ale C mírně zvýšený, což díky uhlíkovému varu při použití O_2 , nevyžaduje jeho snížení.

Množství očkovačla bylo pro poslední tavbu stanoveno pro vytvoření vhodné LKG 0,9%, což činí 97 g, a modifikátoru 1,3 %, tedy 140 g, pro konečné množství taveniny (10,95 kg) po odebrání TA a vzorků.

Tab. 39 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba VI.)

C	Mn	Si	P	S
4,00	0,35	0,56	0,127	0,011

Tlak plynného O_2 při poslední tavbě byl nižší než u předchozích taveb s očekáváním lepších výsledků. Po třech aplikacích se obsah P snížil o 14 % (viz tab. 40). Díky této tavbě se povedlo upřesnit požadovanou dobu a tlak.

Tab. 40 Chemické složení vsázky po 3 aplikaci plynného O_2 (Tavba VI.)

C	Mn	Si	P	S
3,61	0,06	0,05	0,110	0,008

Po aplikaci Na_2CO_3 proběhlo přelití z EIP do pánve a zpět dvakrát po sobě v rozmezí 2 minut pro zkrácení prostoje. Obsah C se podle předpokladu snížil, ale nejdůležitějším údajem při této finální tavbě je snížení množství P, které je 83,5 % (viz tab. 41).

Tab. 41 Chemické složení po přidání 4 hm. % Na_2CO_3 , 2 přelitích a po 15 sekundách použití plyným O_2 (Tavba VI.)

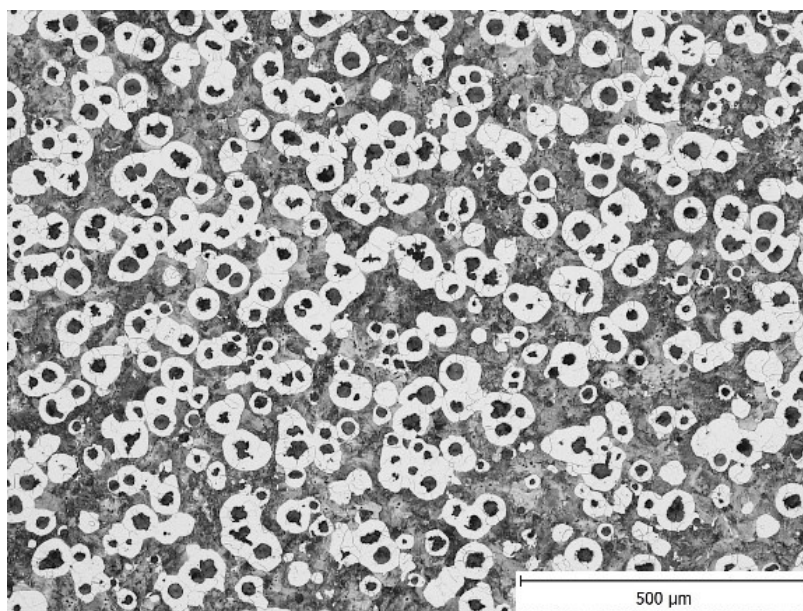
C	Mn	Si	P	S
3,41	0,08	< 0,01	0,021	0,002

Výsledný stav chemického složení LKG stanovuje obsah P 0,041 % (viz tab. 42). Snížení množství z výchozího stavu vsázkového materiálu až po vytvořenou litinu je 67,7 %. Tento výsledek podtrhuje výborné vlastnosti Na_2CO_3 jako prostředku pro snížení obsahu P vysokopecního železa, jež může být následně užito jako vsázkový materiál pro výrobu LKG.

Tab. 42 Chemické složení výsledného stavu LKG (Tavba VI.)

C	Mn	Si	P	S
3,15	0,16	2,59	0,041	0,003

Na mikrostruktuře poslední tavby vidíme matici perlitickou – feritickou, jež se značně liší od námi požadovaného složení, avšak díky absenci karbidických fází můžeme konstatovat, že navážka BIOMETU byla již na hranici maxima. Grafitizační očkování se však jeví jako dostatečné vzhledem k vysokému počtu zárodků (viz obr. 35).



Obr. 35 Tavba VI., LKG, grafit VI 100, ferit 25, zv. 100 x, leptáno 4 % Nital

Metalurgické zpracování vsázky pro jakostní litiny

Pevnost v tahu (viz tab. 43) nevyhovuje normě ČSN EN 1563, avšak ostatní mechanické vlastnosti jsou v jejím souladu.

Tab. 43 Mechanické vlastnosti LKG (Tavba VI.)

Pořadí odlévání	Smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{10} [%]	Tvrdość HBW
1.	268,5	462,8	2,04	232

5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo stanovení metody pro metalurgické zpracování surového železa užívaného jako vsázkový materiál při výrobě jakostní litiny s kuličkovým grafitem a feritickou, popřípadě feriticko – perlitickou matricí na EIP pomocí Na_2CO_3 . Důraz byl primárně kladen na snížení množství P oproti vsázce. Výsledná struktura materiálu musela být v souladu s normou ČSN EN 1563.

Pro optimalizaci metody jsme při prvních tavných (viz. 4.1 Tavné určené optimalizaci navážky Na_2CO_3) zjistili přesné množství Na_2CO_3 , které je schopno se vzhledem k množství taveniny kompletně rozpustit a zajistit co nejvyšší účinek snížení množství P. Součástí výzkumu bylo také určit množství a postup dávkování Na_2CO_3 pro zjištění závislosti rychlosti rozpouštění v tavenině vůči naváženému množství. Rozdíl rychlosti rozpouštění Na_2CO_3 v tavenině nebyl pozorován, proto ve všech tavných kapitoly 4.2 Tavné pro výrobu tvárné litiny, byla Na_2CO_3 aplikována naráz. Z výzkumu pana Moriy [13] jsme využili poznatků ohledně množství dávek Na_2CO_3 s vlivem na snižování P a S (viz obr. 13) a stanovili jsme počáteční dávku 30 g/kg, tedy 3 hm. % (viz. 4.1.1 Tavná I. pro optimalizaci Na_2CO_3). Při tomto množství jsme zjistili snížení obsahu P pouze 17 %, avšak u 4 hm. %, tomu bylo v rozmezí 60 – 85 %. Množství 4 hm. % Na_2CO_3 se díky tavně III. (viz. 4.2.3 Tavná III.) prokázalo jako hraniční. U vsázkového materiálu s obsahem P vyšším než 0,12 %, doporučujeme použití plynného O_2 vedoucí k jeho snížení pomocí oxidace. Dosažením hodnoty P v tavenině pod 0,12 % před aplikováním 4 hm. % Na_2CO_3 , můžeme zaručit snížení množství P ve výsledné LKG minimálně o 60 % výchozího stavu.

Následujícím a zároveň finálním krokem před modifikací bylo přelévání taveniny do nahřáté lící pánve a nazpět do EIP. V pánvi probíhalo dle potřeby stahování strusky. Proces napomáhá lepšímu promíchání taveniny. Rychlé roztavení aplikovaného Na_2CO_3 navíc vede ke zkrácení doby prostoje před odléváním. Kvůli rychlému snížení teploty taveniny v pánvi o cca 100°C bylo nutno tuto proceduru vykonat do 3 minut kvůli možnému ztuhnutí tekutého kovu. Proto po přelití taveniny zpět do EIP probíhalo zvýšení její teploty. Proces jsme aplikovali po otevření hladiny taveniny pro naměření teploty. V průměru se doba prostoje zkrátila o $\frac{2}{3}$ hodnoty zmíněné ve výzkumu pana Moriy [13], což mělo za následek snížení množství P přecházejícího ze strusky zpět do taveniny při nafosfování (viz. 3.5 Nafosfování taveniny).

Při výrobě LKG bylo pro modifikaci využito BIOMETU FeSiMg8 v průměru 1,1 hm. % a pro očkování FeSi75 0,9 hm. %. Pro dosažení obdobných výsledků při provozní výrobě je nutno postupovat dle stanoveného množství a chemického složení námi užívaného modifikátoru a očkovačla. Z důvodu omezeného výběru typu lící pánve jsme modifikaci prováděli pomocí Sandwich metody (viz 3.6.2 Metody využívající Mg ve formě předslitin pro modifikaci LKG). Při využití jiných metod modifikace nelze, zaručit dosažení požadované struktury LKG dle ČSN EN 1563.

Závěrem nutno podotknout, že metoda metalurgického zpracování surového železa s užitím Na_2CO_3 v EIP pro výrobu LKG je velmi efektivní, vzhledem ke snížení množství P. Při všech našich tavných jsme docílili požadované struktury a chemického složení LKG dle ČSN EN 1563. Navíc pořizovací cena surového železa a Na_2CO_3 je bezmála o polovinu nižší než cena čistého, vsázkového materiálu PIG – NOD. Z tohoto důvodu je námi stanovený postup také velmi ekonomicky výhodný.

6. Seznam obrázků

1. Obr. 1 Schéma rovnovážného binárního diagramu metastabilní (plně) a stabilní (čárkovaně) soustavy Fe – Fe ₃ C [3]	3
2. Obr. 2 LKG, grafit chunky 60, VI 40, zv. 100 x, neleptáno [1]	4
3. Obr. 3 Rozdělení grafitických litin dle tvaru grafitu [6].....	6
4. Obr. 4 Celé zrno kuličkového grafitu [1]	6
5. Obr. 5 Schématické znázornění růstu kuličkového grafitu – a) spirálový růst; b) růst tvorbou bazálních rovin [2]	7
6. Obr. 6 Tavba I. pro optimalizaci Na ₂ CO ₃ ,LLG, grafit I 100, perlit 95, zv. 100 x, leptáno 4 % Nital	10
7. Obr. 7 LČG, grafit III 75, VI 25, zv. 100 x, neleptáno [6]	12
8. Obr. 8 Graf vlivu obsahu Si na mechanické vlastnosti pro Silaly [1]	13
9. Obr. 9 Graf závislosti uhlíkového ekvivalentu na tloušťce stěny odlitku, znázorňující optimální CE pro LKG [1].....	15
10. Obr. 10 - Graf znázorňující výsledný tvar grafitu v litinách v závislosti na množství zbytkového Mg [12]	18
11. Obr. 11 Graf procentuálního množství složek obsažených ve strusce po aplikaci 40 g/kg Na ₂ CO ₃ po dobu 15 minut při teplotách 1250, 1350, 1450°C [13].....	19
12. Obr. 12 Graf působení Na ₂ CO ₃ (40 g/kg) na snižování procentuálního množství P a S v závislosti na času při teplotách 1250, 1350, 1450°C [13].....	20
13. Obr. 13 Graf snižování množství P, Si a S v tavenině za čas 15 minut při T = 1250°C při aplikování 10, 20, 30 a 40 g/kg Na ₂ CO ₃ [13].....	21
14. Obr. 14 Využití Mg různých druhů modifikátorů v závislosti na teplotě [1].....	22
15. Obr. 15 Rozdělení metod výroby LKG [1].....	24
16. Obr. 16 Náskres modifikování pomocí rotační bubnové pánve – 1. a 2. případ fungují na totožném principu, s rozdílem umístění zásobníku modifikátoru [1].....	25
17. Obr. 17 Schématické znázornění připravené pánve pro modifikaci litinové taveniny polévací metodou Sandwich [1]	27
18. Obr. 18 Schématické znázornění připravené pánve pro modifikaci litinové taveniny polévací metodou [1]	27
19. Obr. 19 Schématické znázornění pánve pro polévací metodu systémem Tundish - Cover [17].....	28

20. Obr. 20 Krystalizační zárodek grafitu [1].....	29
21. Obr. 21 Mikrostruktura LKG: 1. neočkovaná tavenina, modifikátor NiMg; 2. očkovaná tavenina plněným profilem s 0,067 % FeSi75 [3].....	31
22. Obr. 22 Tavba I. pro optimalizaci Na ₂ CO ₃ , LLG, grafit I 100, perlit 98, zv. 100 x, leptáno 4 % Nital	34
23. Obr. 23 Tavba II. pro optimalizaci Na ₂ CO ₃ , LLG, grafit I 100, ferit 70, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital (2 % Na ₂ CO ₃)	36
24. Obr. 24 Tavba II. pro optimalizaci Na ₂ CO ₃ , LLG, grafit I 90, II 10, ferit 60, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital (3 % Na ₂ CO ₃)	37
25. Obr. 25 Tavba II. pro optimalizaci Na ₂ CO ₃ , LLG, grafit I 100, ferit 60, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital (4 % Na ₂ CO ₃)	37
26. Obr. 26 Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku LKG dle normy ČSN 42 0311	40
27. Obr. 27 Tavba I.; 1. lití, LČG, grafit III 80, VI 20, ferit 40, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital	42
28. Obr. 28 Tavba I.; 2. lití, LKG, grafit VI 100, ferit 90, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital...	42
29. Obr. 29 Tavba II.; 1. lití, LKG, grafit VI 90, zv. 200 x, neleptáno	45
30. Obr. 30 Tavba II.; 2. lití, LKG, grafit VI 90, V 10, ferit 15, zv. 200 x, leptáno 4 % Nital	45
31. Obr. 31 Tavba II.; 1. lití, LKG, grafit VI 100, zv. 1 000 x, neleptáno.....	46
32. Obr. 32 Tavba II.; 1. lití, LKG, grafit VI 70, V 30, zv. 500 x, neleptáno 4 % Nital (REM).....	46
33. Obr. 33 Tavba IV., LKG, grafit VI 82, III 18, ferit 65, zv. 100 x, leptáno 4 % Nital .	50
34. Obr. 34 Tavba V., LKG, grafit VI 100, ferit 70, zv. 100 x, leptáno 4 % Nital.....	52
35. Obr. 35 Tavba VI., LKG, grafit VI 100, ferit 25, zv. 100 x, leptáno 4 % Nital	54

7. Seznam tabulek

1. Tab. 1	Statistický přehled výroby LKG v ČR v roce 2008 [9].....	8
2. Tab. 2	Preferované chemické složení LKG v hmotnostních procentech [1].....	9
3. Tab. 3	Seznam typů tvárné litiny vyráběné v závodě AMEPO s.r.o. [7]	10
4. Tab. 4	Chemické složení a mechanické vlastnosti LČG; GGV – 30 (s feritickou maticí a GGV – 40 (s perlitickou maticí) [2].....	11
5. Tab. 5	Doporučené množství C a Si, pro výrobu LKG s požadovaným druhem matrice s ohledem na tloušťku stěny odlitku [3]	16
6. Tab. 6	Chemické složení skupin sloužících jako předslitiny pro modifikaci pomocí Ce a KVZ [1]	23
7. Tab. 7	Klady a zápory užívání čistého Mg jako modifikátoru pro výrobu LKG [1]...	24
8. Tab. 8	Chemické složení grafitizačních očkovačů na bázi ferosilicia pro výrobu LKG [1]	30
9. Tab. 9	Chemické složení vsázkového materiálu (Tavba I. pro optimalizaci Na_2CO_3)	33
10. Tab. 10	Chemické složení vsázkového materiálu (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3)	34
11. Tab. 11	– Chemické složení taveniny po 1. dávce Na_2CO_3 (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3).....	35
12. Tab. 12	– Chemické složení taveniny po 2. dávce Na_2CO_3 (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3).....	35
13. Tab. 13	– Chemické složení taveniny po 3. dávce Na_2CO_3 (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3).....	35
14. Tab. 14	– Chemické složení taveniny po 4. dávce Na_2CO_3 (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3).....	35
15. Tab. 15	Výsledné chemické složení odlitých vzorků pro metalografický rozbor (Tavba II. pro optimalizaci Na_2CO_3).....	35
16. Tab. 16	Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba I.; 1. lití; 2. lití)	40
17. Tab. 17	Chemické složení taveniny před modifikací a očkováním (Tavba I.).....	41
18. Tab. 18	Přepočet navážky FeSi75 a BIOMETU pro 1. a 2. lití (Tavba I.).....	41
19. Tab. 19	Výsledné chemické složení LKG (Tavba I.; 1. lití)	41
20. Tab. 20	Mechanické vlastnosti LKG z 1. a 2. lití (Tavba I.; 1. lití; 2. lití).....	43

21. Tab. 21 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba II.; 1. lití; 2. lití)	43
22. Tab. 22 Přepočet navážky FeSi75 a BIOMETU (Tavba II.; 1. lití; 2. lití).....	43
23. Tab. 23 Chemické složení taveniny po vsypání Na ₂ CO ₃ (Tavba II.).....	44
24. Tab. 24 Chemický rozbor – bodová analýza bodů 1, 2, 3 na REM snímku viz obr. 32	47
25. Tab. 25 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba III.).....	47
26. Tab. 26 Chemické složení surového železa po přidání 1. dávky Na ₂ CO ₃ (Tavba III.).....	47
27. Tab. 27 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba IV.).....	48
28. Tab. 28 Chemické složení taveniny po použití O ₂ (Tavba IV.).....	48
29. Tab. 29 Chemické složení po přidání 4 hm. % Na ₂ CO ₃ (Tavba IV.)	49
30. Tab. 30 Chemické složení litinové taveniny před modifikací a očkovaním, přidání FeSi75, pro zvýšení Si alespoň na hodnotu 1,5 % (Tavba IV.).....	49
31. Tab. 31 Chemické složení výsledného stavu LKG (Tavba IV.).....	49
32. Tab. 32 Mechanické vlastnosti LKG (Tavba IV.)	50
33. Tab. 33 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba V.).....	51
34. Tab. 34 Chemické složení vsazeného surového železa po 2 aplikaci plynného O ₂ (Tavba V.).....	51
35. Tab. 35 Chemické složení po přidání 4 hm. % Na ₂ CO ₃ a 2 přelitích (Tavba V.)	51
36. Tab. 36 Chemické složení před modifikací a očkovaním, přidání FeSi75, pro zvýšení Si alespoň na hodnotu 1,5 % pro výrobu LKG (Tavba V.)	51
37. Tab. 37 Chemické složení výsledného stavu LKG (Tavba V.)	52
38. Tab. 38 Mechanické vlastnosti LKG (Tavba V.)	53
39. Tab. 39 Chemické složení výchozího vsazeného surového železa (Tavba VI.).....	53
40. Tab. 40 Chemické složení vsázky po 3 aplikaci plynného O ₂ (Tavba VI.).....	53
41. Tab. 41 Chemické složení po přidání 4 hm. % Na ₂ CO ₃ , 2 přelitích a po 15 sekundách použití plynným O ₂ (Tavba VI.).....	54
42. Tab. 42 Chemické složení výsledného stavu LKG (Tavba VI.).....	54
43. Tab. 43 Mechanické vlastnosti LKG (Tavba VI.)	55

8. Seznam použité literatury

- [1] PLACHÝ, Jan a Vlastislav OTÁHAL. *Jakostní litiny: určeno středně techn. a nižším kádrům ve slévárnách a konstruktérům*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1956, 282 s.
- [2] GEDEONOVÁ, Zora. *Metalurgia liatin*. Vyd. 1. Košice: Hutnícka fakulta Technickej univerzity, 2000, 288 s. ISBN 80-709-9516-5.
- [3] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1998, 166 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1263-1.
- [4] ROUČKA, Jaromír. *Slévárenství*. Vyd. 1. Brno: Svaz sléváren ČR, 2005, 360 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 0037-6825
- [5] GEELS, Kay a In collaboration with Daniel B. Wolf - Ulrich Kopp IN COLLABORATION WITH DANIEL B. FOWLER. *Metallographic and materialographic specimen preparation, light microscopy, image analysis, and hardness testing*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007. ISBN 978-080-3156-913.
- [6] SKOČOVSKÝ, Petr, Alan VAŠKO a Peter PALČEK. *Kvantitatívne hodnotenie štruktúry liatin*. Vyd. 1. Žilina: EDIS, 2007, 73 s. Vysokoškolská učebnice. ISBN 978-80-8070-748-4.
- [7] ArcelorMittal Engineering Products Ostrava s.r.o. *Slévárna* [online]. 2015 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://amepo.cz/cz/article/slevarna>
- [8] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [9] *Slévárenství*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2009, 57., 7- 8. ISSN 0037-6825. Dostupné z: http://www.slevarenstvi.svazslevaren.cz/download/7_8-2009.pdf

- [10] KEOUGH, J. R. a K. L. HAYRYNEN. *Designing with Austempered Ductile Iron (ADI)*. In: Schaumburg, IL, USA: AFS Proceedings, 2010, 15 s.
- [11] *Foseco ferrous foundryman's handbook*. Oxford: Elsevier, 2005, 360 s. ISBN 07-506-4284-X.
- [12] DAWSON, S. *Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron. Sinter Cast* [online]. 1. 2014 [cit. 2015-2-10]. Dostupné z: <http://sintercast.com/file/documents/pdf/library-2/technical-publications-1/2014/published-papers/SinterCast-Process-Control-for-the-Reliable-High-Volume-Production-of-Compacted-Graphite-Iron.pdf>
- [13] MORIYA, Takaharu a Masanobu FUJII. Dephosphorization and Desulfurization of Molten Pig Iron by Na_2CO_3 . *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1981, vol. 21, issue 10, s. 732-741. DOI: 10.2355/isijinternational1966.21.732.
- [14] LÁNA, Ivo. *Mimopecní úprava litiny vyrobené v kupolové peci s cílem zvýšení metalurgické jakosti odlitků: Outside furnace cast iron modification made in cupola furnace with the aim of increase metallurgical quality of castings* : zkrácená verze Ph.D. Thesis. [V Brně: Vysoké učení technické], c2008. 35 s. ISBN 978-80-214-3705-0.
- [15] MORES, Antonín. *Slévárenství. Výroba odlitků z litiny s kuličkovým grafitem v České republice, stav v roce 2012*. 2013, 61. ročník, 3 - 4, s. 86 - 94. DOI: 0037-6825.
- [16] DOUBLE, D. D. a A. HELLAWELL. *The nucleation and growth of graphite—the modification of cast iron*. *Acta Metallurgica Materialia*, 1995, Vol. 43, s. 2435-2442. ISBN 10.1016/0956-7151(94)00416-1.
- [17] VONDRÁK, Vladimír, Jiří HAMPL a Aleš HANUS. *Metalurgie litin: mimopecní zpracování roztavené litiny (očkování, modifikace)*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2005, 133 s. ISBN 80-248-0777-7.

- [18] ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, c2008, 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [19] MYSLIVEC, Theodor. *Fyzikálně chemické základy ocelářství*. 2., přeprac. a rozš. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1971, 445 s.
- [20] BROŽ, Ludvík. *Hutnictví železa*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 460 s.